

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

VOL.48 NO.3 September 2009

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 48 卷 第 3 号 (Vol. 48, No. 3), 2009 年 9 月 (September 2009)

目 次 (CONTENTS)

1. 消波ブロック被覆堤における消波工被覆状態の静水面波圧に及ぼす影響
..... 関 克己・有川 太郎・水谷 雅裕 3
(Influence on Wave Pressures of Wave-Dissipating Block state on Breakwater with Wave-Dissipating Block Layer
..... Katsumi SEKI, Taro ARIKAWA, Masahiro MIZUTANI)

2. ブシネスクモデルを用いて算定したリーフ上護岸の設計諸元に関する考察
..... 平山 克也・春尾 和人・宮里 一郎 23
(Evaluation of Design Wave Condition for Seawall on Coral Reef Calculated in Boussinesq-type
Wave Transformation Model
..... Katsuya HIRAYAMA, Kazuto HARUO, Ichiro MIYAZATO)

ブシネスクモデルを用いて算定したリーフ上護岸の設計諸元 に関する考察

平山 克也*・春尾 和人**・宮里 一郎***

要 旨

一般に、護岸の天端高は、沖合より波浪変形計算等を行って換算沖波波高等の設計諸元を算定した後、合田(1975)による越波流量算定図を用いて推定される越波流量が、対象となる護岸背後の利用状況や重要度に応じて決められた許容越波流量を超えないように決定する。しかし、沖縄周辺の海域は、浅瀬やリーフ地形といった複雑な海底地形が発達しているため、単純に合田の越波流量算定図を適用することが難しく、このような設計諸元の算定法を確立することが長年の課題となっている。

宮国ら(2008)は、リーフ地形をモデルとした断面越波実験を行い、リーフ上の短周期波高をもとに、リーフ上の砕波等による平均水位上昇量や、サーフビートに伴う水位変動量を設計潮位に考慮した上で、合田の越波流量算定図を適用する方法を提案し、算定値が実験値と非常に良く一致することを示した。ただし、この適用にあたっては、リーフ上のこれらの波浪諸元を何らかの方法で精度良く見積もることが不可欠である。

そこで、本研究では、浅瀬やリーフといった複雑な海底地形での波浪変形特性を精度良く計算できる最新のブシネスクモデル(NOWT-PARI, Ver5.3)を用いて、リーフ上護岸の設計諸元を算定する方法を提案した。すなわち、リーフ周辺の複雑な海底地形による屈折や浅水変形、およびリーフ上の砕波や遡上等を考慮して、リーフ上護岸前面の波高分布を算定した。また、同時に計算される砕波等による平均水位上昇量およびサーフビートに伴う水位変動量を算定して、リーフ上護岸前面の設計水深の設定法を示した。さらに、この設計水深とリーフ上護岸前面波高を用いて、設計換算沖波を算定した。

このようにして算定したリーフ上護岸前面の設計諸元を現地へ適用することにより、複雑な波浪変形が生じるリーフ上護岸においても合田による越波流量算定図が利用可能となり、適切な設計を行うことができる。

キーワード：ブシネスクモデル，リーフ，越波量，護岸設計，平均水位上昇，サーフビート

* 海洋・水工部海洋研究領域波浪研究チームリーダー

** 海洋・水工部海洋研究領域波浪研究チーム研究官

*** 海洋・水工部海洋研究領域波浪研究チーム研修生

Evaluation of Design Wave Condition for Seawall on Coral Reef Calculated in Boussinesq-type Wave Transformation Model

Katsuya HIRAYAMA*

Kazuto HARUO**

Ichiro MIYAZATO***

Synopsis

Wave overtopping rate for a designed seawall can be evaluated in the diagrams proposed by Goda (1975) using the equivalent offshore wave height and the water depth in front of the seawall. Moreover, Miyakuni et al. (2008) suggested that the wave set-up and the surf-beat should be added to the design water depth for the seawall on a coral reef flat. The evaluation of such a design condition on the surf, however, is much difficult because the wave transformation is complicated in the target area because of wave breaking and run-up on spatial topography in the reef area.

In this study, the evaluation of the surf condition is carried out by using the Boussinesq-type wave transformation model developed by Hirayama and Hiraishi (2005), which can reproduce wave dissipating, wave set-up and surf-beat generated in wave breaking zone on a complicated coral reef bathymetry. Thus, the design wave height can be directly calculated and the design water level can be evaluated with the calculated wave set-up and surf-beat height. Additionally, the wave overtopping rate on the designed seawall is calculated by using Goda's diagram in order to verify the applicability of this procedure for seawall design in an actual coral reef.

Key Words: Boussinesq model, coral reef, overtopping rate, seawall design, wave set-up, surf-beat

* Head, Wave Group, Coastal and Ocean Eng. Research Division, Marine Environment and Eng. Dept.

** Researcher, Wave Group, Coastal and Ocean Eng. Research Division, Marine Environment and Eng. Dept.

*** Visiting Engineer, Wave Group, Coastal and Ocean Eng. Research Division, Marine Environment and Eng. Dept.

3-1-1 Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5042 Fax : +81-46-841-3888 e-mail:hirayama@pari.go.jp

目 次

要 旨	23
1. まえがき	27
2. リーフ上護岸の設計諸元とその算定法	27
2.1 リーフ上護岸の設計諸元	28
2.2 従来 of 算定法	30
2.3 ブシネスクモデルを活用した算定法	31
3. ブシネスクモデルによるリーフ上の波浪場の算定	..... 32
3.1 対象としたリーフ地形と波浪条件	.. 32
3.2 地形・境界データの作成と計算条件の設定	.. 33
3.3 ブシネスクモデルによる波浪変形計算結果	..... 38
4. リーフ上護岸の設計諸元の算定結果に関する考察 ..	.. 40
4.1 設計水深および換算沖波波高	.. 40
4.2 従来法による算定結果との比較 ...	.. 43
5. まとめ	.. 46
6. あとがき	.. 47
謝辞	.. 47
参考文献	.. 47
記号表	.. 48
付録A ブシネスクモデルによる波浪変形計算結果（図面集）	.. 49
付録B 広いリーフ上での波高減衰に関するブシネスクモデルの計算精度について	.. 58

1. まえがき

海岸等護岸の一般的な設計では、沖から護岸前面までの海底地形による沖波の屈折、浅水変形をエネルギー平衡方程式法（高山，1991）により算定後、得られた護岸前面波高から換算沖波を推定する。しかしながら、複雑な海底地形が広がるリーフ上護岸周辺では、屈折、浅水変形に加え、砕波や波の遡上、および波の非線形変形などが卓越するため、これらを考慮できる新たな波浪変形計算法を用いて、設計波等の設計諸元を算定する手法の確立が求められている。

ところで、平山ら（2004,2005）は、乱れ生成項に段波によるエネルギー損失を適用した乱流モデルに基づく砕波減衰計算法、ならびに引き波時に海底面が露出することも許容する遡上計算法を備えたブシネスクモデル（NOWT-PARI, Ver5.3）を開発し、浅瀬やリーフといった複雑な海底地形上で生じる、砕波による波高減衰や平均水位上昇などの波浪変形特性を精度良く再現できることを、模型実験や現地波浪観測との比較により検証している。また、沖波の多方向性や平面的な波浪変形を考慮することができ、一度に広範囲かつ局所的な波浪特性を推定することができるという優れた特徴を有している。

一方、リーフ上護岸周辺では、波による平均水位上昇（ウェーブセットアップ）や水位の長周期変動（サーフビート）が特に顕著となるため、その設計においては、このような特有の波浪特性を考慮することが求められる。例えば、リーフ上護岸の越波量を推定する際にも、単純に合田による越波流量算定図を適用することが難しく、このような設計諸元の算定法を確立することが長年の課題となっている。

この課題に対し、宮国ら（2008）は、リーフ地形をモデルとした断面越波実験を行い、リーフ上護岸の越波特性を明らかにした。また、この実験で得られたリーフ上の波浪諸元である短周期波高、平均水位上昇量、およびサーフビートによる水位変動量を考慮することにより、合田による越波流量算定図を適用して算定した値が実験値と非常に良く一致することを示している。しかし、これらは1次元的なリーフ地形上の波浪変形結果に基づいたものであるため、現地での適用にあたっては、平面的に広がるリーフ上の波浪諸元を、何らかの方法で精度良く見積もることが不可欠である。

また、川崎ら（2008）は、規則波を対象として複雑な海底地形・断面形状における越波実験を行い、リーフ上での波浪変形が護岸越波特性に影響を及ぼすことを明らかにするとともに、数値波水路CADMAS-SURFを用いた再

現計算を行い、その有用性を示している。ただし、不規則波に対する越波特性および平面的な波浪特性についての言及までは至っていない。

そこで、本研究では、浅瀬やリーフといった複雑な海底地形で生じる平面的な波浪変形特性を精度良く計算できる前述のブシネスクモデル（NOWT-PARI, Ver5.3）を用いて、リーフ上護岸の設計諸元を算定する方法を提案する。さらに、具体的なリーフ上護岸を取り上げ、その設計諸元の算定例を従来の方法による算定結果と比較することにより、本研究で提案する算定手法が実務での適用性に優れていることを示す。

2. リーフ上護岸の設計諸元とその算定法

この章では、リーフ上護岸の設計諸元を決定するにあたり、これまで一般的に用いられてきた従来の算定法と、本研究で提案する新たな算定法について、それぞれ概説する。ここで、リーフ上波高の算定法については、従来の算定法の例として高山ら（1977）の実験公式（以下高山式）を取り上げ、新たな算定法ではブシネスクモデル（NOWT-PARI, Ver5.3）を用いた算定法を提案する。



図-2.1 珊瑚礁の地形

（Great Barrier Reef Marine Park, 2001 に追記して転載）

2.1 リーフ上護岸の設計諸元

合田による越波流量算定図から護岸越波流量を推定し、所要天端高を算定する際には、設計諸元として、前面海底勾配、設計水深および換算沖波波高が必要となる。一般的な護岸設計では、設計水深は潮位を考慮した静水深とし、既知の海底地形データを用いてエネルギー平衡方程式等による波浪変形計算を行い、その結果算定された進行波の護岸前面波高から換算沖波波高を算出する。

一方、リーフ上護岸の設計では、越波流量算定図を適用する際、リーフ上の波浪特性を考慮した設計水深、換算沖波波高を用いる必要がある。なぜなら、リーフ上の波浪特性は、比較的深い水深から5m程度の浅い水深まで急勾配で駆け上がるリーフエッジと、浅くほぼ一様な水深が続くリーフフラットおよびラグーンからなる、リーフ特有の地形によって大きく影響されるためである(図-2.1)。すなわち、沖から伝播した波浪は、リーフエッジ周辺で砕波し、波高が急激に減衰するとともに、リーフ上を遡上した水塊による顕著な平均水位上昇と、砕波点の移動や波群特性等に起因するサーフビートが発達する。

そこで、このようなリーフ上での波浪特性を考慮した護岸の設計水深、換算沖波波高、およびその他の設計諸元の算定方法を以下に示す。

(1)設計水深

リーフ上の水深は、リーフエッジ等で生じる砕波に伴う平均水位上昇とサーフビートに大きく依存する(図-2.2)。宮国らは、リーフ地形をモデルとした断面越波実験を行い、リーフ上護岸前面の水深 h_d として、静水深 h に対し、砕波による平均水位上昇量 η_{bar} 、サーフビート波高 $H_{L1/3}$ の影響を考慮し、次式を提案している。

$$h_d = h + \eta_{bar} + aH_{L1/3} \quad (1)$$

ここで、サーフビート波高 $H_{L1/3}$ は、断面模型実験で計測されたデータをもとに設定されているため、護岸前面で形成される重複波高を意味している。そこで、これを明示するために $H_{L1/3} = H_{L1/3_S}$ と定義すると、(1)式は次式のように書き直すことができる。

$$h_d = h + \eta_{bar} + aH_{L1/3_S} \quad (2)$$

ここで、係数 a は、サーフビートによる水面の長周期変動のうち、最も水面が上昇したときの水面位置を表すように設定するのがよいと考えられる(すなわち、越波流量の算定に際して、設計上の安全側を考える)。仮に、

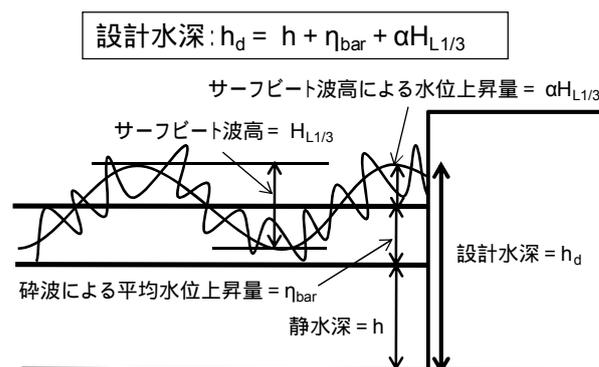


図-2.2 リーフ上護岸に対する設計水深の考え方

サーフビート波形の振幅が平均水位を基準に対称であるとすると、 $a=0.5$ と設定できる。なお、これは、護岸前面の水位変動の片振幅にあたる水位上昇が、全越波時間を通じて継続すると仮定したことに相当する。

一方、宮国らは、リーフ上護岸の越波流量算定に与えるサーフビートの影響を前述の断面越波実験により確認し、 $a=0.7$ を得ている。

いまのところ、上記の検討例を除いて、この係数値を決定する確かな根拠は定まっていないが、概ね $a=0.5 \sim 0.7$ とするのが良いと考えられる。なお、後述する4.1節では、現地リーフ地形を対象とした数値計算によるサーフビート波形を対象として、それらの波形が有する波高頻度分布の特性を調べ、係数 a の値がもつ物理的意味について考察している。いずれにしても、係数 a の推定にあたっては、今後、更なる検討が必要である。

一方、式(2)は、護岸前面の水位の長周期変動のうち、沖から入射する進行波の有義波高 $H_{L1/3_I}$ を用いると、次式のように表わされる。

$$h_d = h + \eta_{bar} + a * b H_{L1/3_I} \quad \text{ここで、} H_{L1/3_S} = b H_{L1/3_I} \quad (3)$$

護岸によるサーフビート波形の反射率を1(完全反射)とし、この水面変動は規則的であると仮定すると、サーフビートにより形成される護岸前面の重複波高は、入射波高の2倍となることが想定される(すなわち、 $b=2$)。なお、式(3)のような定義は、サーフビートによる護岸前面の重複波高が直接得られる場合、すなわち、現地観測によって直接観測したり、これらのデータをもとに構築された近似式によって推定したりする場合には、必ずしも必要としない。しかし、後述するビジネスモデルを用いた設計計算のように、進行波のみを対象とした波浪変形計算の結果から直接推定する場合には、護岸位置で算定されるサーフビート波高は、現地観測や模型実験で直

接的に得られる重複波高ではなく、短周期波と同じ進行波の波高となっていることに注意が必要である。なお、この場合、 $b=2$ とすることの妥当性については、後述するように、護岸前面の重複波高をブシネスモデルで直接計算することにより、別途確認する。

以上より、リーフ上護岸の越波量算定に必要な設計水深は、それぞれ次のように表わされる。

宮国ら (2008)

$$h_d = h + \eta_{\text{bar}} + 0.7H_{L1/3_S} = h + \eta_{\text{bar}} + 1.4H_{L1/3_I} \quad (4)$$

(式(3)において、 $a=0.7$ 、 $b=2$)

サーフピート波形が上下対称である場合

$$h_d = h + \eta_{\text{bar}} + 0.5H_{L1/3_S} = h + \eta_{\text{bar}} + 1.0H_{L1/3_I} \quad (5)$$

(式(3)において、 $a=0.5$ 、 $b=2$)

(2)換算沖波波高

換算沖波は、屈折や回折などによる波高変化の影響を設計計算に取り入れやすくするための仮想的な波として定義され、換算沖波波高 H_0' は、回折係数 K_d 、屈折係数 K_r 、沖波波高 H_0 を用いて、次式で与えられる(合田, 2008)。

$$H_0' = K_d K_r H_0 \quad (6)$$

一方、港湾・海岸構造物の設計計算においては、換算沖波波高 H_0' を用いて整理された各種の算定図表を利用するために、対象地点で得られた有義波高 $H_{1/3}$ から換算沖波波高 H_0' を逆算することがよく行われる。このとき、換算沖波波高に含める波高変化の影響をどこまで考えるか、すなわち、a)式(6)で定義される屈折および回折の影響のみを含める場合 (= 相当深水波)、あるいは、b)式(6)に加え、利便性の観点から、沖から対象地点までに生じる砕波等による波高減衰まで含める場合、でその逆算方法が異なると考えられる。

そこで以下では、この2通りの場合に分けて、それぞれの算定法を概説するとともに、リーフ上護岸の設計に用いる換算沖波波高を考える場合には、本来の定義とは異なるが、後者の方法により算定することを提案する。

a) 相当深水波としての換算沖波 (本来の定義)

例えば、エネルギー平衡方程式等を用いた波浪変形計算により算定される、砕波帯外の有義波高 $H_{1/3}$ に対する換算沖波波高 H_0' は、次式で算出できる。

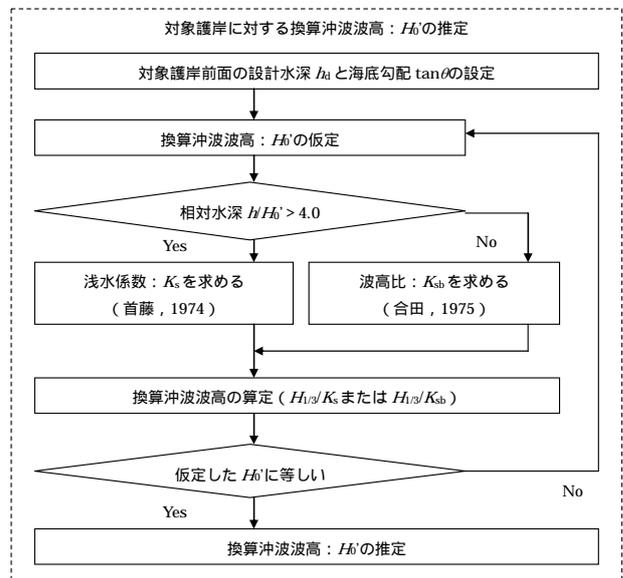
$$H_0' = H_{1/3} / K_s \quad (7)$$

ここに、 K_s は首藤(1974)による非線形浅水係数である。

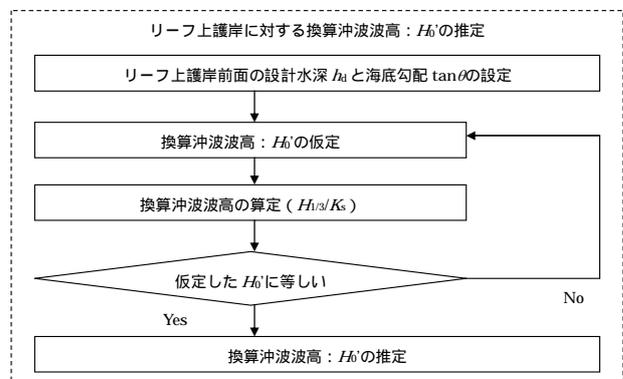
同様に、砕波変形を考慮できるブシネスモデル等により算定される砕波帯内の有義波高 $H_{1/3}$ に対して、平山(2007)は、合田(1975)による砕波帯内波高の略算式より得られる波高比 K_{sb} (平山ら, 2006)を用いて、次式で算定することを提案している。

$$H_0' = H_{1/3} / K_{sb} \quad (8)$$

なお、これは、対象地点で得られた有義波高 $H_{1/3}$ の砕波減衰量を見込み、砕波帯内波高に対して、この波高変化の影響を受けない、式(7)と等価な換算沖波 (= 相当深水波) 波高を逆算するものである。



(a) 相当深水波としての換算沖波



(b) 波高減衰効果を含めた換算沖波

図-2.3 換算沖波の算定手順

具体的には、これらは図-2.3(a)に示す手順により算定する。すなわち、まず、設計水深 h_d と海底勾配 $\tan\theta$ において、初期値として設定した H_0' に対する相対水深 h/H_0' を求め、この値が4より大きいときは沖で砕波しないものとみなし、非線形浅水係数算定図などを用いて浅水係数 K_s を得る。一方、相対水深 h/H_0' が4以下の場合には砕波帯内の有義波高の略算式から波高比 $H_{1/3}/H_0'$ を得る。次に、設計潮位に対して実施した波浪変形計算で得られた波高 $H_{1/3}$ をこれらの浅水係数、または波高比で減ずることにより、換算沖波波高 H_0' を得る。この作業を繰り返し、得られた H_0' と相対水深等を得る際に仮定した H_0' とが等しくなるときの H_0' を、換算沖波波高として採用する。

b) 波高減衰効果を含めた換算沖波（便宜的な方法）

砕波帯内やリーフ上に設置される構造物に作用する波は、沖での屈折、回折変形に加え、岸近くの浅水、砕波変形等の影響を受けて波高が変化している。このうち、岸近くの浅水・砕波変形の影響を除いた換算沖波波高は式(8)によって算定できる。しかし、図-2.1に示すリーフ地形などでみられるように、砕波後の波がリーフ上を伝播する過程である程度再生する場合、このような波が作用する構造物の設計計算においては、砕波減衰後の波高に対する換算沖波波高 H_0' を算定する必要があると考えられる。なお、越波流量算定図をリーフ上護岸に適用した宮国ら（2008）の研究も、このような考え方に基づいているものと思われる。

そこで、砕波減衰後にリーフ上で再生した波が、仮想的にはリーフ沖から来襲したものであったと考え、その換算沖波波高 H_0' は、リーフ内の対象地点で得られた有義波高 $H_{1/3}$ に対して、砕波帯外に対するものと同様に、式(7)で算定できると考えられる。なお、対象地点における水深は、前項で検討した設計水深を用いる。

具体的には、図-2.3(b)に示す手順により算定する。すなわち、まず、設計水深 h_d と海底勾配 $\tan\theta$ において、初期値として設定した H_0' に対して浅水係数 K_s を得る。次に、設計潮位に対して実施した波浪変形計算で得られた有義波高 $H_{1/3}$ をこの浅水係数 K_s で除することにより、換算沖波波高 H_0' を得る。この作業を繰り返し、得られた H_0' と相対水深等を得る際に仮定した H_0' とが等しくなるときの H_0' を、換算沖波波高として採用する。

なお、本研究においては、リーフ上護岸前面の有義波高に対する換算沖波波高は、この方法により算定した。

(3) その他の条件

越波流量を推定する際に必要となる海底勾配は、リー

フ上護岸前面の海底地形が既知の場合には、波が直角入射すると仮定し、護岸近傍における直角方向の平均的な海底勾配を算出することとした。なお、作用波の波向きに関して、高山ら（1984）は、入射角が 0° から 30° に傾くにつれて、護岸の所要天端高は直角入射の場合の70%にまで低下するという結果を得ている。しかし、浅いリーフ上を伝播する波向きは微地形による影響を受けやすいため、本研究では、設計上の安全側を考慮し、特段の事情がない限り、作用波は直角方向に入射すると仮定した。

一方、合田による越波流量算定図は、ある特定の海底勾配に対して与えられているため、それ以外の海底勾配に適用する場合には、適宜内挿して用いる。本研究では、これらの図表を数式化した高山ら（1982）の近似式を用いて、任意の設計水深、換算沖波波高、および海底勾配に対する護岸越波流量を算定することとした。

2.2 従来の算定法

砕波帯内の波高変化は、通常、合田（1975）による算定図あるいは略算式を用いて推定される。しかしながら、水深の浅い平坦な海底地形が長く続くリーフ海岸における波高変化は、一般に、高山ら（1977）による実験公式（以降、高山式という）によって推定されることが多い。

高山式を用いてリーフ上護岸前面の波高を推定する際には、換算沖波波高、リーフ先端での有義波高と平均水位上昇量、リーフ上の静水深、およびリーフ先端から護岸前面までの距離が必要となる。

このうち、リーフに入射する換算沖波波高は、リーフ沖（近傍）の有義波高から式(7)を用いて算定される。また、リーフ先端での有義波高は、一般に、砕波帯内波高の略算式やエネルギー平衡方程式法を用いた波浪変形計算を実施して算定することが多い。しかし、本研究で提案する算定法との比較のために、現地リーフ地形上の護岸前面波高を高山式により算定する場合には、リーフ上の波高分布の算定状況を直接比較できるよう、リーフ沖（近傍）での有義波高（すなわち、これから算定される換算沖波波高）や、リーフ先端での有義波高は、ブシネスクモデルにより算定することとした。

また、リーフ先端での平均水位上昇量は、合田（1975）の平均水位の変化図より算出できる。これらを高山式へ当てはめることにより、リーフ上での波高 $H_{1/3x}$ および平均水位上昇量 $\eta_{\text{bar}x}$ を算定する。

一方、平面的に分布する実際のリーフ地形は局所的に大きく変化し、例えば球面浅瀬の背後では屈折により波が集中して波高が増大するため、リーフ上の波高分布は、できるだけ多方向不規則波を用いた平面実験を行って再

現することが望ましいとされている(平石,1992).また,平山(2002)は,ブシネスクモデルを用いて球面浅瀬を対象とした波浪変形計算を実施し,これらをよく再現できることを確認している.高山式は断面実験結果に基づいて提案されたものであるため,一般に,リーフ上の平面的な波浪変形を考慮できない.したがって,屈折等により側方のリーフエッジからも波が伝播する場合などには,リーフ上護岸前面の波高も大きく変化することに注意が必要である.

一方,サーフビート波高 $H_{L1/3}$ は,サーフビートの現地観測結果から得た合田(1975)による関係式を用い,換算沖波波高,水深,および沖波波長からサーフビート水位の2乗平均値: ζ_{rms} を求め,さらに,サーフビート水位の出現頻度分布が正規分布に従うとして得られる,この値と各統計量の関係式より算出する.すなわち,サーフビートの有義波高は, $H_{L1/3}=4.004 \cdot \zeta_{rms}$ のように算定できる.

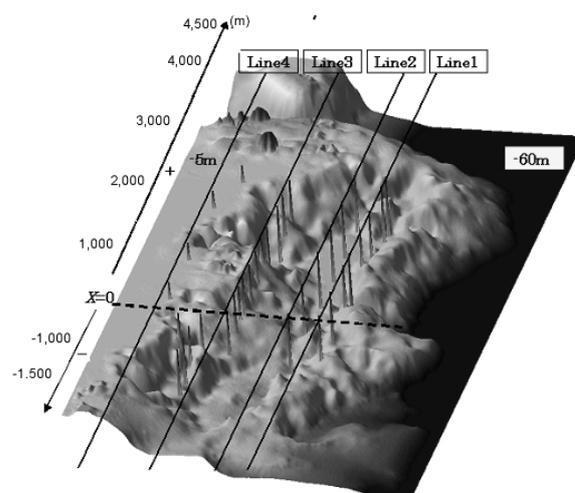


図-2.4 平面模型鳥瞰図

2.3 ブシネスクモデルを活用した算定法

本研究では,リーフ上の砕波に伴う波高減衰,平均水位上昇,およびサーフビートを,ブシネスクモデルを用いて同時に算定することを提案する.そこで以下では,この算定に用いるブシネスクモデルの概要,および具体的な算定法を述べる.

(1) ブシネスクモデル(NOWT-PARI, Ver5.3)の概要

本研究で使用するブシネスクモデルは,リーフ上での砕波減衰モデルおよび引き波時に海底面が露出することも許容する遡上モデルを備えた最新のブシネスクモデル(NOWT-PARI, Ver5.3)とする.平山ら(2005)は,現地リーフ地形を対象とした平面模型実験結果を用いて,このモデルによる計算精度の検証を行い,少なくともリーフエッジ周辺とその近傍のリーフ内(図-2.1参照)で生じる,砕波による波高減衰と平均水位上昇について,非常に高い精度で再現できることを確認している.その際の平面模型の鳥瞰図と波高分布の再現結果を,図-2.4,図-2.5に示す.

なお,ラグーンを含むリーフ内で生じる波浪変形に対する計算精度については,別途,付録Bで確認できる.

(2) 具体的な算定法

ブシネスクモデルを用いて,リーフ上護岸の設計諸元を算定する具体的な手順を図-2.6に示す.

まず,リーフ上の波浪変形計算を行うブシネスクモデルの沖側の造波境界の位置と,そこで与える入射波諸元を設定するため,エネルギー平衡方程式法を用いて,設

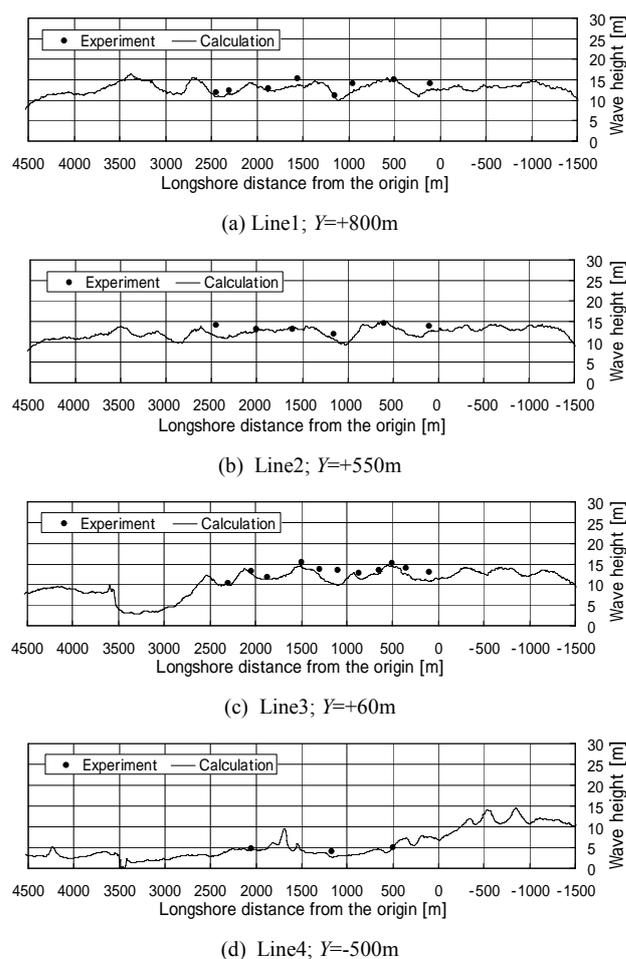


図-2.5 波高分布の再現性

計沖波に対する波浪変形計算を実施する。この際、ブシネスクモデルに対して設定する計算領域は、エネルギー平衡方程式法による計算結果を正しく引き継げる水深、すなわち、沖合の海底地形による方向スペクトル形状の変化が顕著とならない範囲で、計算時間の短縮等の要請により、できるだけ小さくすることが望ましい。

ここで、平山・宮里（2009）は、造波境界上のある地点で与えられた任意形状スペクトルから多方向不規則波を造波する手法を提案し、より効率的な計算領域の設定を可能とした（詳細は後述）。本研究ではその成果を活用し、エネルギー平衡方程式によって計算された変形後の方向スペクトルをそのままブシネスクモデルへ入射させることとした。しかし、造波境界上の各地点でほぼ様な方向スペクトルを与えなければならないという制約は未だ解消されていないため、ブシネスクモデルに対する造波境界は、屈折・浅水変形の影響が少ない海底地形上に設定することが必要である。本研究においても、ブシネスクモデルにおける造波境界はこれにらって設定することとした。

次に、陸地や構造物による反射条件等の境界条件、および差分計算に必要なその他の条件（タイムステップ等）

を設定する。その際、対象護岸の設置位置に護岸地形は設定せず、代わりに、反射波が計算されないよう十分な幅を有するスポンジ層を設定する。これは、換算沖波波高が対象地点における進行波の波高に対して定義されているためである。

このように設定した入射波諸元・境界条件を用いて、ブシネスクモデルによる波浪変形計算を実施する。

計算終了後、あらかじめ指定しておいたリーフ上護岸前面の各代表点における水位変動データを抽出する。これらの時系列データを、数値フィルターを用いて、短周期波成分（30s未満）と長周期波成分（30s以上）に分離したうえで、それぞれゼロアップクロス法による統計解析を行うことにより、リーフ上護岸前面における短周期波高 $H_{1/3}$ 、サーフビート波高 $H_{L1/3}$ 、および平均水位上昇量 η_{bar} が算定できる。これらを式(3)に代入することにより設計水深が、また、図-2.3(b)の算定手順に従い各リーフ上護岸に対する換算沖波波高が、それぞれ算定できる。なお、計算結果として合わせて出力される、波高や平均水位の平面分布、および残差流（波による流れ）や平均波向きのベクトル分布等を適宜活用することにより、リーフ周辺で形成される波浪場を平面的に把握することも可能である。

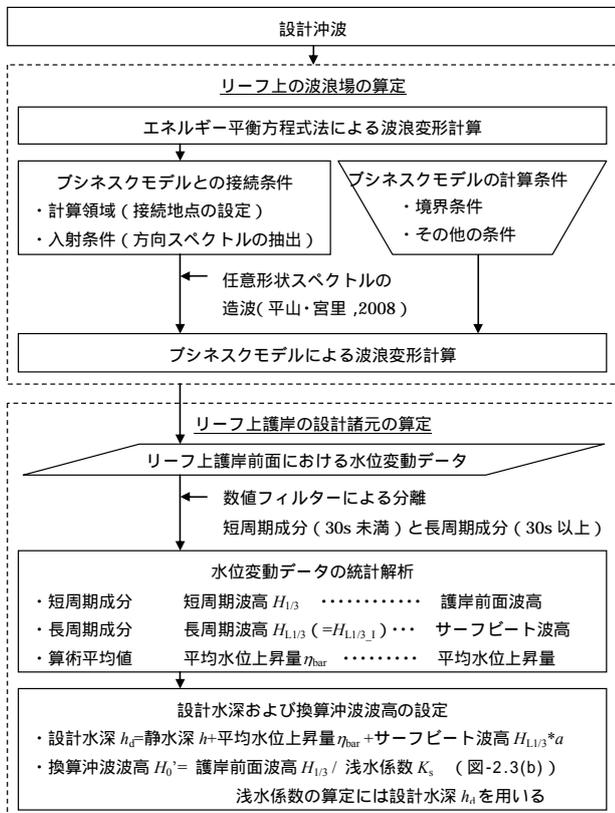


図-2.6 リーフ上護岸の設計諸元の算定手順

3. ブシネスクモデルによるリーフ上波浪場の算定

本章および次章では、前章で提案したブシネスクモデルによるリーフ上護岸の設計諸元の算定法に従い、複雑に発達したリーフ上に建設が予定されている臨港道路護岸を対象として、これらの設計諸元の具体的な算定例を示す。特に本章では、リーフ上の波浪諸元を算出するブシネスクモデルによる波浪変形計算について説明する。

3.1 対象としたリーフ地形と波浪条件

(1) 位置および地形条件

臨港道路浦添線（全長約2.5km）の建設が予定されている海域には発達したリーフが広がり、水深は浅くフラットである。一方、リーフエッジはこの沖合約2.0kmに位置し、水深25m程度まで急に深くなる。また、沖には、東に沖縄本島海岸、南に浦添ふ頭、さらに西に約10km沖合には、慶伊諸島（チービシ）が位置する。なお、計画では臨港道路沖合まで浦添第一防波堤が延伸される予定であるが、現在のところ事業実施までには至っていない。図-3.1に臨港道路の位置と周辺地形、およびNOWPHAS（全国港湾海洋波浪情報網）の那覇波浪観測地点を示す。

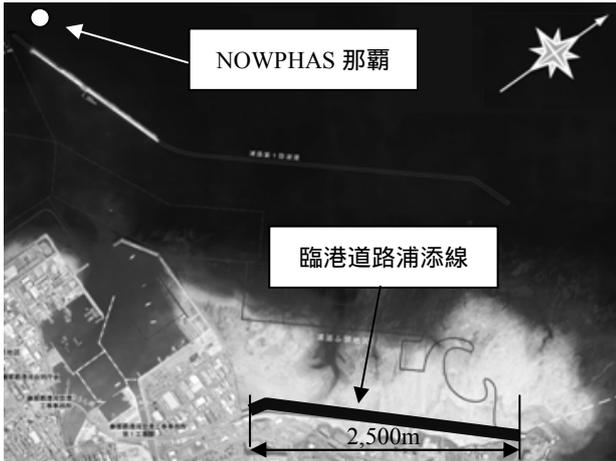


図-3.1 臨港道路およびNOWPHAS 那覇観測地点の位置

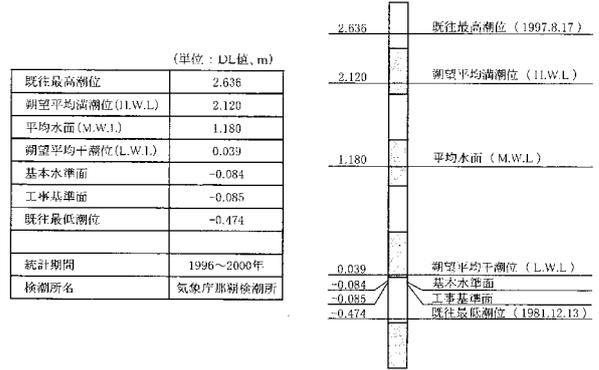


図-3.3 那覇港の潮位

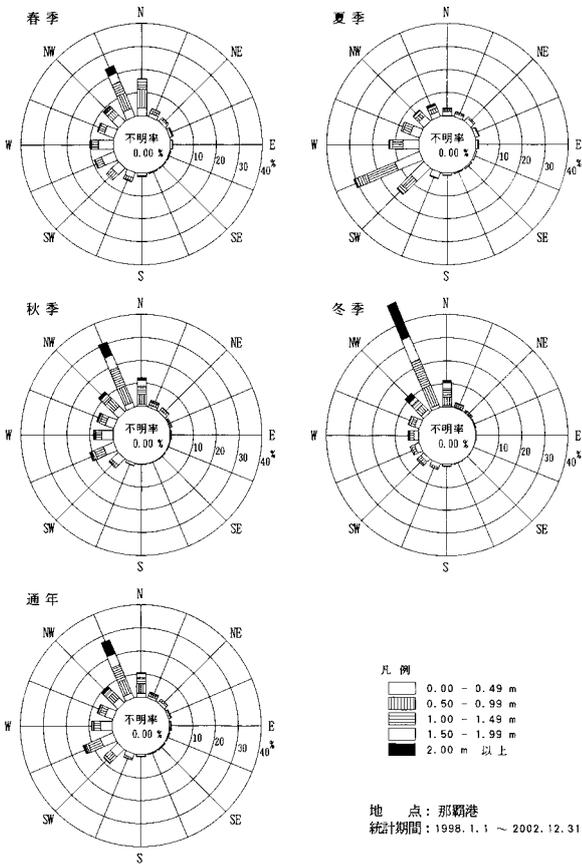


図-3.2 那覇港波浪出現頻度分布

表-3.1 那覇港および周辺各港の設計潮位

	那覇港	中城湾港	平良港	石垣港
H.H.W.L.	+3.20	+3.20	+3.10	+3.10
H.W.L.	+2.10	+2.10	+1.90	+1.90
L.W.L.	±0.00	±0.00	+0.10	+0.10

(2) 波浪および潮位条件

NOWPHAS那覇観測地点において、1998~2002年の5年間に得られた波浪出現頻度分布を図-3.2に示す。この図より、那覇港における波浪は、夏の台風期にWSW、冬期風浪時にNNWに卓越していることがわかる。また、臨港道路護岸に襲撃する波浪は前項の地形条件等もふまへ、N系およびW系であることが推測される。したがって、設計波の波向は、N~NW~WSWまでの6方位で代表できると考えられる。

一方、潮位条件は、天文潮、気象潮および津波等による異常潮位の実測値や推算値に基づき、沖縄総合事務局によって、各港の設計潮位が表-3.1のとおり定められている。参考として、図-3.3に那覇港の潮位図を示す。

3.2 地形・境界データの作成と計算条件の設定

ここでは、リーフ上の波浪諸元を算定するブシネスクモデルによる波浪変形計算を実施するため、必要な入力条件および計算条件を設定する。

(1) 水深および地形データの作成

臨港道路護岸前面の複雑な地形条件をできるだけ詳細に表現するために、水深および地形データは、深浅測量図等を含む表-3.2に示す資料をもとに、図-3.4に示す手順により作成した。ここで、これらの基準面はD.L.に統一した。作成した水深データの鳥瞰図を図-3.5に示す。

(2) 沖波の算定

対象地点に入射する波浪諸元を算定するためには、その元となる沖波諸元が必要である。対象とした臨港道路護岸に対する沖波は、構造物の重要度を考慮し、50年確率波を用いることが相当と思われる。しかし、対象海域に対する沖波の確率波浪は定められていない。

そこで本研究では、NOWPHAS那覇地点で定められた確率波浪をもとに、エネルギー平衡方程式法を用いた試行計算を実施し、NOWPHAS那覇地点で50年確率波が再現されるような沖での波浪条件を推定し、これを沖波と

して設定した。これらの算定に用いた計算領域(例として、波向きNNW)、計算条件、およびNOWPHAS那覇地点における50年確率波と沖波の推定結果を、図-3.6、表-3.3~5に示す。

表-3.2 地形データの作成に用いた資料一覧

No.	資料名	資料概要	基準面	作成元
1	沿岸の海の基本図デジタルデータ (J-BIRD)	中城湾6508-3、沿岸部水深コンター	基本水準面 (略最低低潮面)	海上保安庁 海洋情報部
2	沿岸の海の基本図	中城湾(海底地形図) 6508-3 (1/50,000)、1985年3月刊行、沿岸部水深コンター (平均水面は基本水準面上1.18m)	基本水準面 (略最低低潮面)	海上保安庁 海洋情報部
3	海図	沖縄島南部 海図番号: W222-A、2004年2月刊行、世界測地系 WGS-84 1:75,000	最低水面 (略最低低潮面) 平均水面 (M.S.L.)= 最低水面+1.18m	海上保安庁 海洋情報部
4	深浅測量結果	現況 平面図 1/4,000 20mメッシュ 数値図	(D.L.)	浦添市土地 開発公社提 供
5	深浅測量結果	那覇港港湾計画図 1/15,000コンター	(D.L.)	那覇港港湾 管理者
6	深浅測量結果	地盤高平面図 1/1,000 10メッシュ	(D.L.)	浦添市土地 開発公社提 供

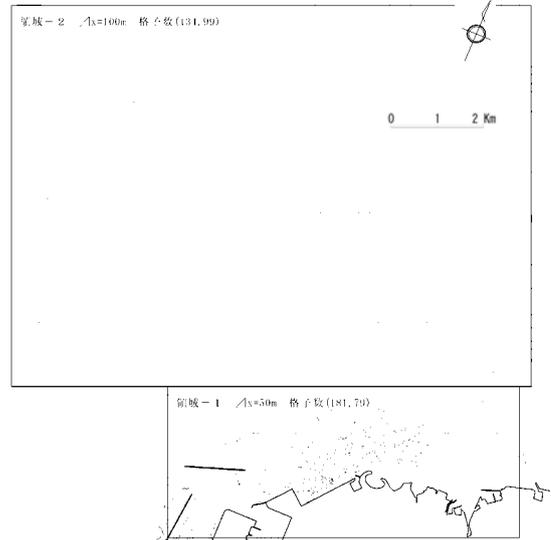


図-3.6 エネルギー平衡方程式法における計算領域

表-3.3 エネルギー平衡方程式法における計算条件

項目	設定条件
方向集中度の最大値	$S_{max} = 5$
入射波スペクトル	プレットシュナイダー光易型
成分波数	20
計算格子間隔	$dx=dy=50.0m$
潮位	$H.H.W.L.=D.L.+3.20m$

表-3.4 NOWPHAS 那覇地点における 50 年確率波

波向	NOWPHAS那覇 観測地点			
	$H_{1/3}$ [m]	$T_{1/3}$ [s]	S_{max}	波向[deg.]
N	8.70	13.6	16	0
NNW	8.23	13.3	11	337
NW	9.09	13.8	16	315
WNW	10.42	15.1	6	293
W	9.92	14.5	8	270
WSW	9.34	14.1	9	248

表-3.5 沖波算定結果

波向	エネルギー平衡方程式により逆算した沖波(入射波)			
	$H_{1/3}$ [m]	$T_{1/3}$ [s]	S_{max}	波向[deg.]
N	11.00	13.8	5	26
NNW	9.40	13.3	5	343
NW	10.80	14.2	5	305
WNW	11.00	14.6	5	288
W	10.82	14.2	5	258
WSW	10.80	14.0	5	220

波向は、NからE周りの角度

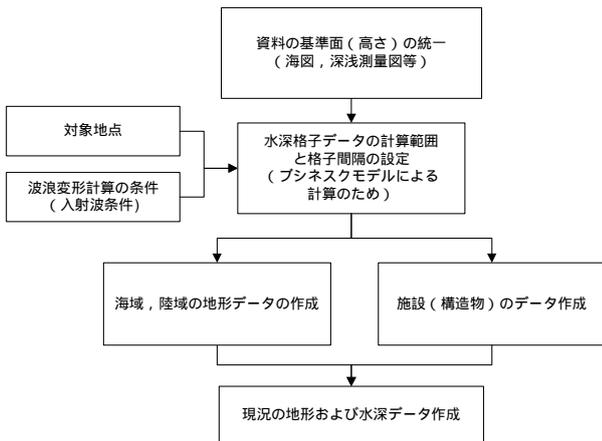


図-3.4 地形データ作成手順

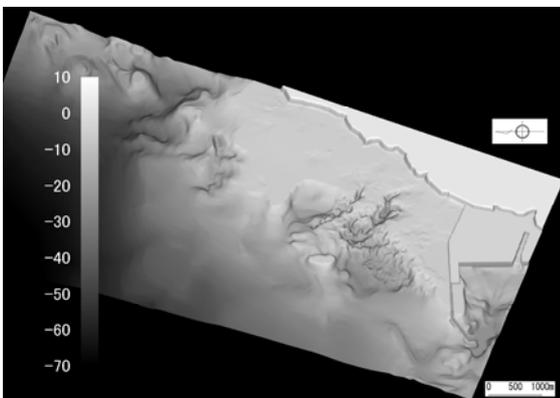


図-3.5 地形・水深データの鳥瞰図

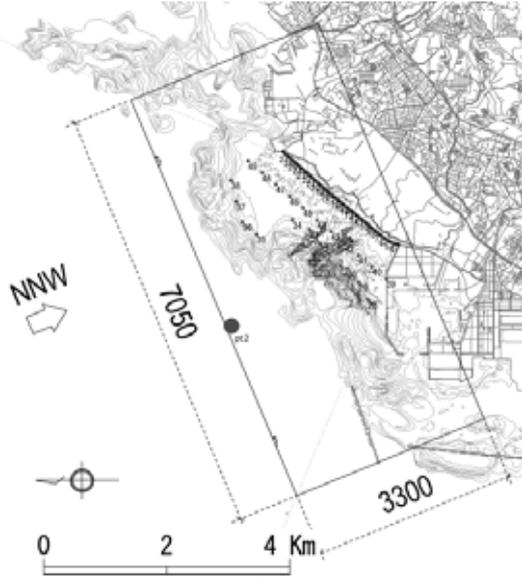
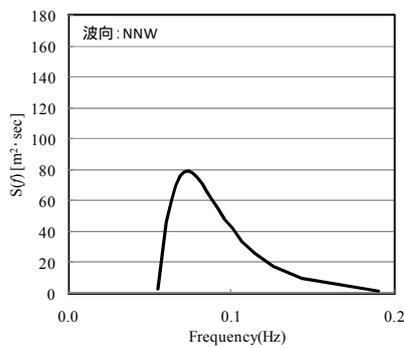
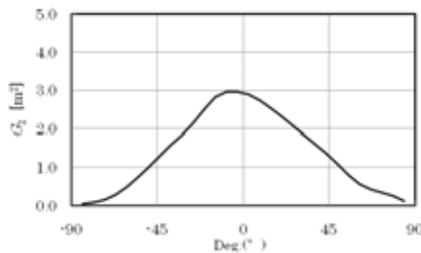


図-3.7 ブシネスクモデルの入射境界と計算領域



(a) 周波数スペクトル



(b) 方向スペクトル

図-3.8 接続地点の周波数・方向スペクトル (NNW)

表-3.6 入射 (接続) スペクトルの代表波浪諸元

ブシネスクモデルの入射波諸元 (入射波境界)				
波向	$H_{1/3}$ [m]	$T_{1/3}$ [s]	S_{max}	波向 [deg.]
N	8.93	13.2	19	5
NNW	8.24	13.1	13	335
NW	9.48	14.1	14	317
WNW	10.11	14.9	10	301
W	9.48	14.5	11	281
WSW	8.23	14.2	13	260

波向は、NからE回りの角度。

(3) 入射波条件と計算領域の設定

次に、沖波を入射波条件としたエネルギー平衡方程式による波浪変形計算を実施し、ブシネスクモデルの計算領域のうち沖側の造波境界の位置と、そこで与える入射波諸元を設定する。このとき、ブシネスクモデルは、時々刻々と変化する水位変動を再現する計算モデルの特性上、エネルギー平衡方程式に比べて非常に長い計算時間を必要とするため、実用的な計算時間を考え、できるだけ計算領域を狭くすることに留意する必要がある。

ここで、現行のブシネスクモデルは、波高、周期ならびに波向きなどの代表波浪諸元を入力条件として、プレットシュナイダー・光易型スペクトルおよび光易型方向関数から成分波を作成し、シングルサンメーション法を用いてそれらを線形に重ね合わせた入力波形を造波することにより、水面波形の伝播過程を計算している。したがって、このような関数スペクトルを用いる際に設ける入射境界は、屈折、回折、および浅水変形などの影響によって、入力すべき方向スペクトルの形状が大きく変化しない海域に設定される必要がある。そのため、現行のモデルでは、入射波境界をある程度沖側に設定する必要があり、計算時間を短縮するための柔軟な計算領域の設定が困難であった。

そこで、平山・宮里 (2009) は、波浪変形後の方向スペクトルの入力を可能とするために、関数スペクトルによらず、任意のスペクトル形状を直接入力できる多方向不規則波の造波法を開発した。本研究では、この成果を活用し、以下の手順に従い、従来よりも岸側に設定された造波境界において、変形後の多方向不規則波を造波し、計算時間の短縮を図ることとした。

任意形状の周波数スペクトルを積分して全エネルギーを算出し、これを成分波の個数 N_s で除して等分割する。なお、成分波の個数 N_s は512とした。

成分波の代表周波数は、エネルギー等分割された各区間の面積を2等分する周波数として設定する。

各成分波の波向は、で設定した代表周波数に対応する方向分布の累積曲線を算出し、これに一樣乱数をあてはめ確率的に決定する。

例として、波向NNWの計算領域に対して設定した入射境界を、計算領域とともに図-3.7に示す。すなわち、ブシネスクモデルに入力する方向スペクトルは、図中の丸印位置で得られたエネルギー平衡方程式法による計算結果を用いた。図-3.8に、入射地点で抽出したNNWの周波数スペクトルおよび方向スペクトルの算出結果を示す。

図より、周波数スペクトルの形状は、エネルギー平衡方程式法で沖波として設定したブレットシュナイダー・光易型スペクトルとほぼ相似であることが確認できる。しかし、方向関数の形状は、沖波として与えた光易型方向関数の形状とは異なり、やや非対称な形状となっていることがわかる。これは、浅海域における海底地形の影響により、成分波の個々の周波数に応じて異なる屈折変形が生じたためと考えられる。なお、参考までに、これ

らのスペクトルに対する代表波浪諸元を表-3.6に示す。

しかしながら、このように改良されたブシネスクモデルにおいても、造波境界上の各地点で与える方向スペクトルは同一で、それらの水深も一定でなければならない。そのため、多方向不規則波造波装置を備えた平面水槽における模型実験と同様に、造波境界に沿った水深は、境界中央付近の平均的な値で一定となるよう設定した。また、このとき、対象とする実際の海底地形との不連続が生じる部分では、急な水深変化をさけるため、造波水深から実地形へすりつける斜面（スロープ）を設定した。このようにして設定したブシネスクモデルの計算領域における、造波水深と斜面勾配、および計算格子数等を表-3.7に、これらの座標の定義を図-3.9に示す。

表-3.7 ブシネスクモデルの計算領域に関する設定値

(a) 造波水深と斜面勾配（スロープ）

主波向き	沖波周期 [s]	$L_0/2$ [m] (参考)	データ最大水深 [m]	設定造波水深 [m]	造波水深からのスロープ
N	13.66	146	40.0	30.0	1/10
NNW	13.29	138	35.0	35.0	1/10
NW	13.94	152	30.0	30.0	1/10
WNW	14.90	173	30.0	30.0	1/20
W	14.58	166	40.0	40.0	1/10
WSW	14.12	156	40.0	40.0	1/10

沖波周期は、NOWPHAS地点の諸元である。
L0は、沖波周期がNOWPHAS地点の周期と同じとしたときの波長である。

(b) 計算領域の大きさ

主波向	格子間隔 [m]	I方向 [m]	J方向 [m]	I方向格子数	J方向格子数	造波水深からのスロープ勾配
N	5.0	3740	6900	748	1380	1/10 0.10
NNW	5.0	3300	7050	660	1410	1/10 0.10
NW	5.0	2700	7050	540	1410	1/10 0.10
WNW	5.0	3200	6800	640	1360	1/20 0.05
W	5.0	4040	6370	808	1274	1/10 0.10
WSW	5.0	4360	5760	872	1152	1/10 0.10

(c) 格子番号の設定

主波向	格子間隔 [m]	IMAX	JMAX	IS	IO	I1	IE	JS	JO	J1	JE	総格子数
N	5.0	842	1464	2+1	2+46	2+799	2+838	2+1	2+41	2+1421	2+1460	1,232,688
NNW	5.0	754	1494	"	"	2+711	2+750	"	"	2+1451	2+1490	1,126,476
NW	5.0	634	1494	"	"	2+591	2+630	"	"	2+1451	2+1490	947,196
WNW	5.0	734	1444	"	"	2+691	2+730	"	"	2+1401	2+1440	1,059,896
W	5.0	902	1358	"	"	2+859	2+898	"	"	2+1315	2+1354	1,224,916
WSW	5.0	966	1236	"	"	2+923	2+962	"	"	2+1193	2+1232	1,193,976

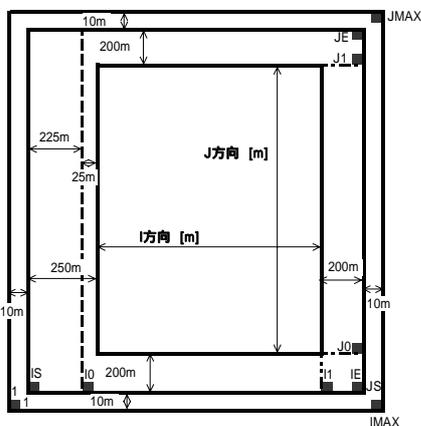


図-3.9 格子座標の定義

(4)境界条件の設定

a)スポンジ層の設定

リーフ上護岸前面における進行波の波高を算定するためには、対象護岸はもちろんのこと、その背後の既設護岸による反射波の影響も排除しておかなければならない。そこで、臨港道路護岸の設置位置背後の既設護岸に、反射波の発生を抑制する消波層（スポンジ層）を設定した。具体的には、既設護岸を陸側に100m幅で削り、そこに反射波を抑制する消波層（スポンジ層）を設置した。なお、数値上の反射率の目標値は0.01とした。これらの設定例を図-3.10に示す。

b)透水層の設定

既設の防波堤や護岸前面に設置された消波工の風波に対する反射率は、通常0.4程度と推定されている。しかし消波工による実際の反射率は、波の波高、周期、波向きに応じて変化すると考えられる。そこで平山・平石(2001)は、このような消波工により発生する任意の反射波を自動的に再現できる任意反射境界（透水層モデル）を開発した。本研究では、リーフに隣接する那覇港の港湾外郭施設による影響を正しく評価するため、消波ブロック部分にこれらを導入した計算を実施している。

すなわち、これらを設定するための透水層データは、消波ブロックの種類や大きさにより異なる、空隙率 λ 、層流抵抗係数 α 、乱流抵抗係数 β 、代表径 d 、天端高 h 、などのパラメータからなる。本研究において透水層データを設定した具体的な港湾外郭施設は、浦添第一防波堤、浦添内防波堤、新港第一防波堤である。これらの設定例および施設ごとの設定値を図-3.11に、消波ブロック毎の各パラメータの設定値を表-3.8に示す。

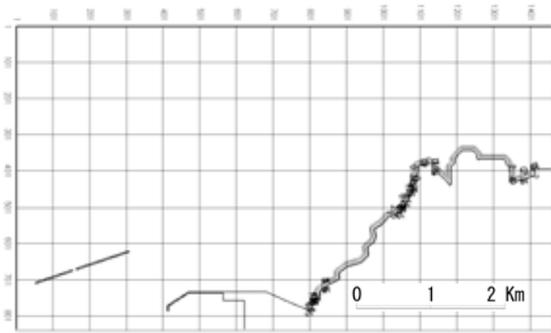
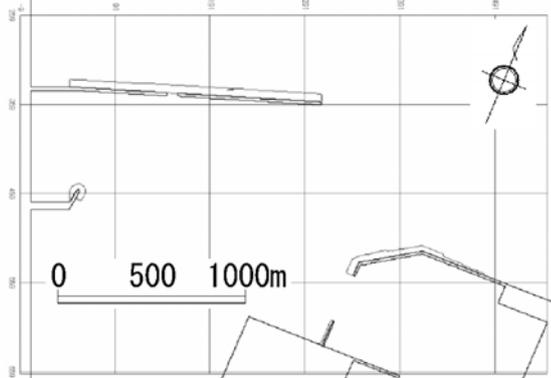
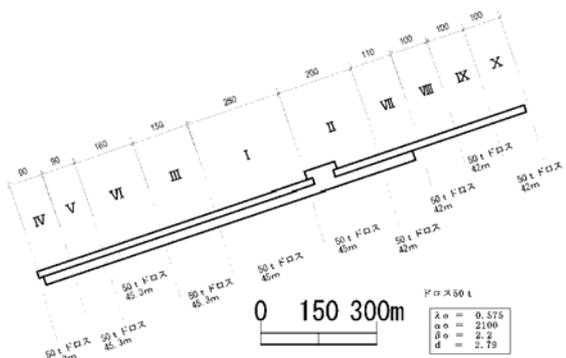


図-3.10 消波層（スポンジ層）設定例（既設護岸前面）



(a) 対象施設の位置



(b) 施設ごとの設定値

図-3.11 消波層（透水層）設定例（消波ブロック被覆工）

表-3.8 消波ブロック毎の各パラメータの設定値

透水層データ設定値

消波ブロック名	トン数	積み方	λ_0	α_0	β_0	代表径d[m]	体積V[m ³]
テトラ	50	乱積	0.5	2100	2.2	2.71	20
テトラ	32	乱積	0.5	2100	2.2	2.32	12.5
テトラ	20	乱積	0.5	2100	2.2	2.00	8
テトラ	16	乱積	0.5	2100	2.2	1.85	6.3
テトラ	12.5	乱積	0.5	2100	2.2	1.71	5
テトラ	5	乱積	0.5	2100	2.2	1.26	2
ドロス	50	乱積	0.575	2100	2.2	2.79	21.739
ドロス	40	乱積	0.575	2100	2.2	2.89	17.391

消波ブロック名	積み方	α_0	β_0
テトラ	整積	1200	1.7
テトラ	乱積	2100	2.2

表-3.9 ビジネスモデルにおけるその他の計算条件

(a) 入射波条件と差分条件

項目	設定値
入射波スペクトル	エネルギー平衡方程式により求めた周波数及び方向スペクトル
成分波数	512
計算格子間隔	$dx=dy=5.0m$
潮位	H.H.W.L.=D.L.+3.20m

(b) 砕波，遡上，底面摩擦に関する計算条件

項目	設定値
砕波モデル	修正擬似段波モデル(1次方程式乱流モデルに基づく)
砕波判定法	水表面での鉛直圧力勾配および砕波限界波高の下限値
砕波指標	鉛直圧力勾配 0.5
底面摩擦係数	0.02
最低水深	遡上計算が可能
最大水深	N:40m, NNW:35m, NW:30m, WNW:30m, W:30m, WSW:40m
遡上モデル	越流公式による遡上・流下フラックスを算定

(c) 計算時間に関する設定

波向	入射波周期 T_{in} [s]	タイムステップ ΔT [s]	データサンプリング間隔 ΔT_{DEL} [s]	繰返時間 T_{IN} [s]	データサンプリング開始時刻 T_{SVE} [s]	計算終了時刻 T_{END} [s]
N	13.20	0.03	0.3	396.0	3036.0	5497.5
NNW	13.10	0.03	0.3	393.0	3013.0	5474.5
NW	14.08	0.04	0.4	422.4	3238.4	6520.4
WNW	14.87	0.02	0.4	446.1	3420.1	6702.1
W	14.51	0.02	0.4	435.3	3337.3	6619.3
WSW	14.16	0.04	0.4	424.8	3256.8	6538.8

(d) アニメーション用データ出力時刻

波向	入射波周期 [s]	データサンプリング開始時刻 $AVST$ [s]	データサンプリング終了時刻 $AVSED$ [s]	データサンプリング間隔 $AVSDT$ [s]
N	13.20	3036.0	3150.0	1.2
NNW	13.10	3013.0	3127.0	1.2
NW	14.08	3238.4	3390.4	1.6
WNW	14.87	3420.1	3572.1	1.6
W	14.51	3337.3	3489.3	1.6
WSW	14.16	3256.8	3408.8	1.6

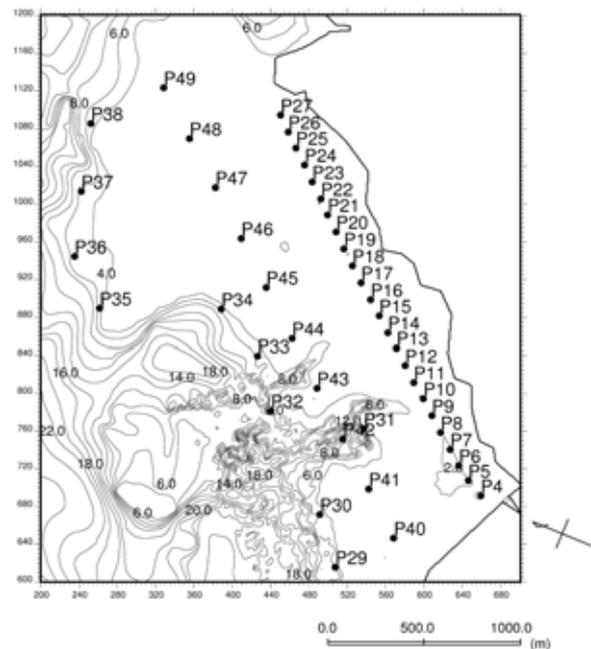


図-3.12 水位変動データ抽出点

c)自然海岸

NOWT-PARI Ver.5.3では海浜の遡上計算が可能のため、水深データにおいて表現された現地の海浜勾配により、入射波に応じた適切な反射波が計算されると考えられる。そのため、自然海岸等の水陸境界において、反射率を調整するための消波層などは特に設定していない。

(5)その他の条件

その他の計算条件を表-3.9に示す。タイムステップ Δt は、入射波周期の1/400とすることを基本とした。ただし、主波向きWNWおよびWのケースでは計算の発散がみられたため、計算の安定性を増すため、 Δt を入射波周期の1/800に変更して計算することにした。

ブシネスクモデルで計算される水位変動データの抽出点は、これらの地点で護岸の設計諸元を算定することを考慮して設定する。すなわち、複雑なリーフ地形により出現する波浪諸元が地点ごとに異なる可能性が高いことを考慮して、道路護岸法線上の24点（P4～P27、約100m間隔）に設定した。これらを図-3.12に示す。

3.3 ブシネスクモデルによる波浪変形計算結果

リーフ上護岸前面およびその周辺の波浪諸元を算定するため、ブシネスクモデルによる波浪変形計算を実施した。以下では、特に冬季風浪時の卓越波向きであるNNWに対する結果を示し、その他の波向きに対する算定結果については付録Aに示す。

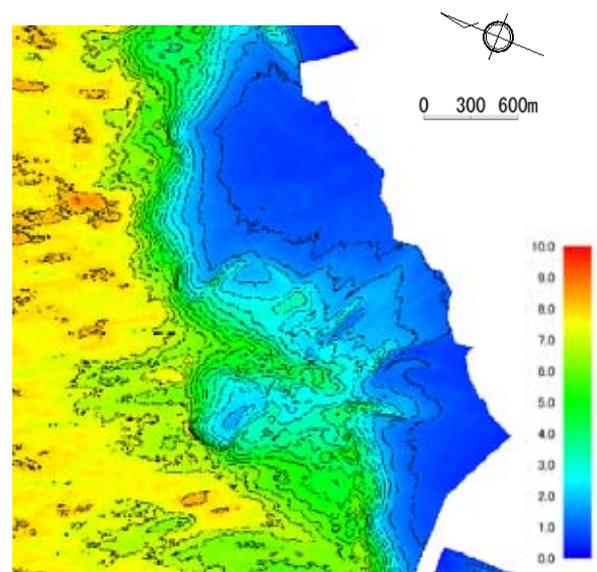
(1)有義波高・平均水位・平均流速の分布

波向NNWに対する有義波高・平均水位・平均流速分布の計算結果を図-3.13に示す。

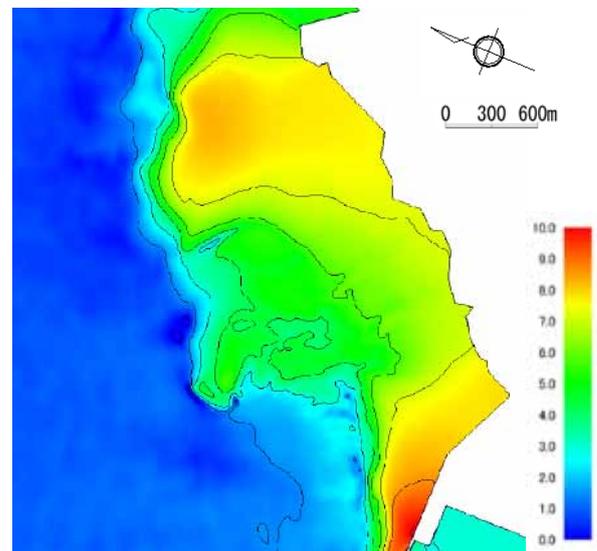
波高分布図と平均水位分布図は、それぞれ図面左から右へ波浪が伝播している様子を表している。沖から入射した波浪がリーフ先端で砕波し、波高が減衰している様子や、砕波した水塊がリーフ上に溜まり平均水位が上昇している様子が伺える。また、平均流速分布は、図面上から下へ波浪を入射させた場合の算定結果を示している。図より、リーフ上に押し付けられた水塊がリーフの切れ目から沖へ流れ出る様子が伺える。護岸天端高の設計において、リーフ上の平均流速の算定結果が直接的な影響を与えることは少ないと考えられるが、リーフ上では局所的に速い流れが発生する可能性があるため、これらは護岸法尻の洗掘対策の検討等に利用できる可能性がある。

(2)水位変動の時系列結果

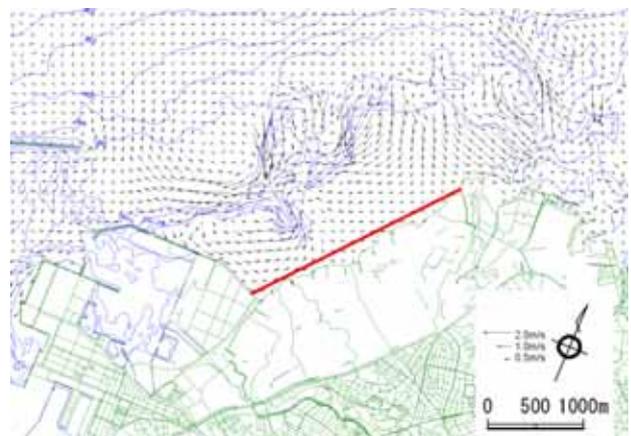
設定した水位変動データ抽出点におけるデータのうち、



(a) 有義波高分布



(b) 平均水位分布



(c) 平均流速分布

図-3.13 ブシネスクモデルによる計算結果（NNW）

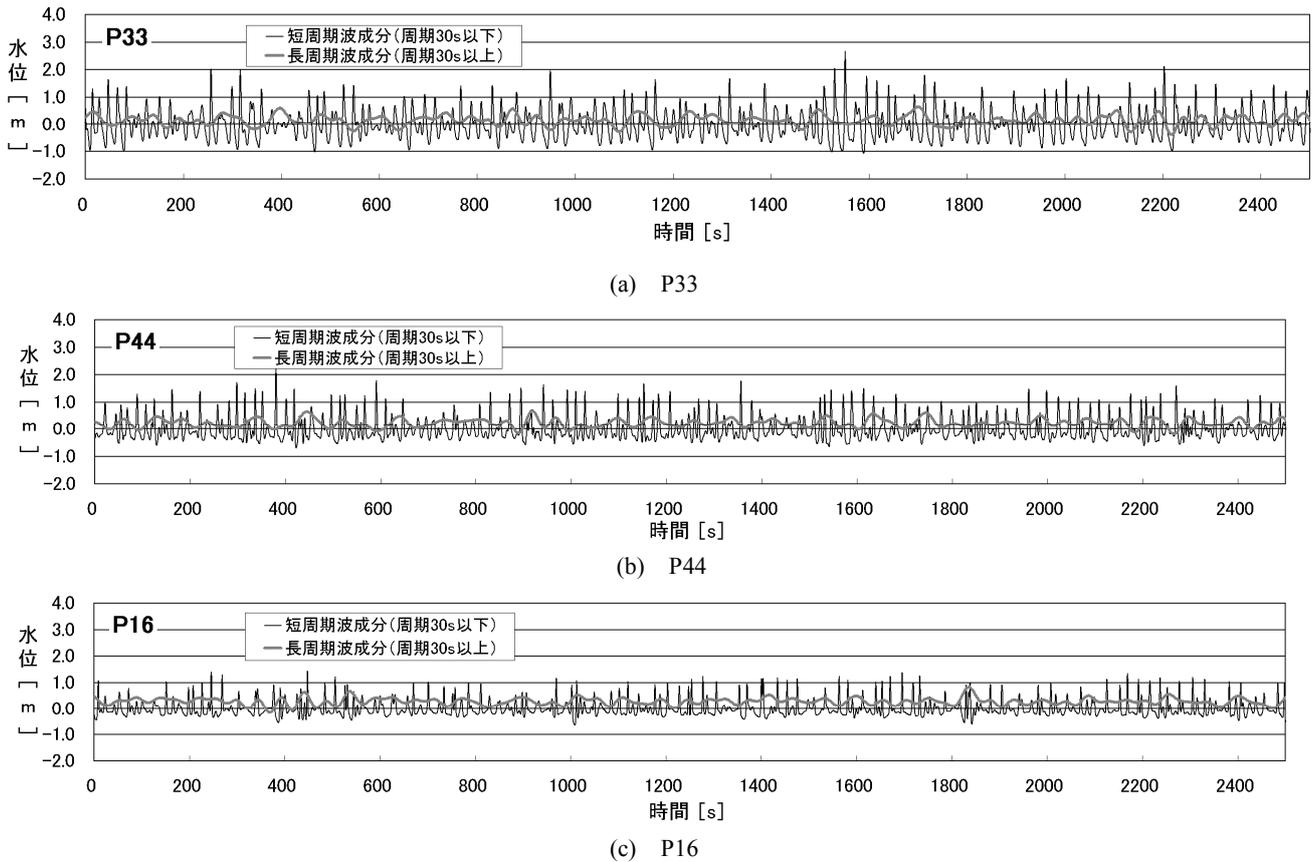


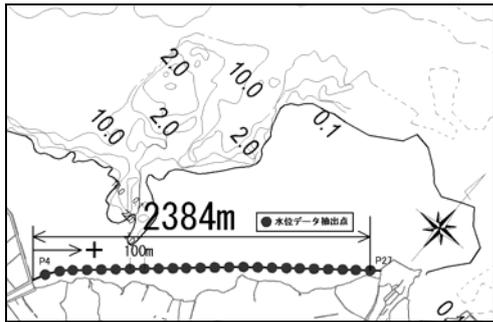
図-3.14 リーフ先端 (P33, P44, P16) で算定された水位変動の時系列データ(NNW)

波向NNWに対して、リーフ先端、リーフ上、護岸前面の各代表点 (P33, P44, P16) (図-3.12参照) で算定された水位変動をそれぞれ図-3.14に示す。図には、横軸に時間、縦軸に水位を表し、水位変動データとともに数値フィルターで処理した短周期成分波、長周期成分波の水位変動結果をそれぞれ示してある。これらより、リーフ先端での碎波に伴い長周期の水位変動が生じていること、および平均水位上昇が生じていることが分かる。また、リーフ先端 (P33)、リーフ上 (P44)、護岸前面 (P16) へと順に波が伝播するに従い、波浪が減衰し、短周期波成分の波形の非対称性が顕著になっていく様子が伺える。

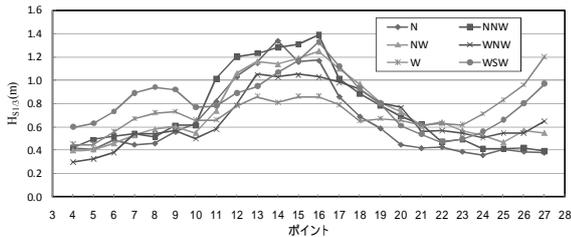
(3) リーフ上護岸前面における波浪諸元

出力された水位変動データを30s未満の短周期波成分とそれ以上の長周期波成分に分離したうえで、それぞれゼロアップクロス法による統計解析を行うことにより、リーフ上護岸前面の短周期波高 $H_{1/3}$ 、水位上昇量 η_{bar} 、およびサーフビート波高 $H_{L1/3}$ を算定した。

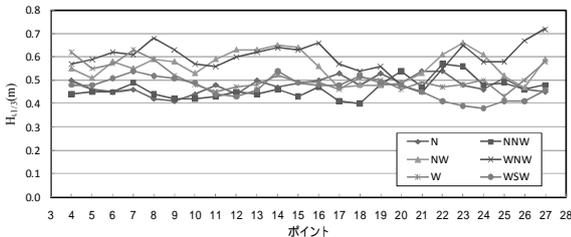
これらのうち、臨港道路護岸法線上の短周期波高、長周期波高、平均水位上昇量の算定結果を図-3.15に示す。図では、横軸に那覇港浦添地区護岸から順に名付けた地点番号、縦軸に波高、水位を示している。特に、短周期波高は地形の影響を大きく受け、各地点、波向ごとに、それぞれ変化がみられる。これらは主に、リーフ周辺およびリーフ上の複雑な海底地形による影響と考えられる。すなわち、概ねどの波向きとも、前面にリーフが広く発達した箇所でも低く、リーフが狭いか切れ目に当たる箇所でも高くなっている。これは、リーフ先端で生じる急激な屈折変形により、リーフエッジに対してほぼ直角方向に波が入射することによるものと考えられる。一方、長周期波高や平均水位上昇量は、護岸法線に沿って変化する様子はみられず、その絶対値はほぼ沖波波高に依存し、最も大きい波向きWNWのとき、すべての地点で長周期波高や平均水位上昇量も大きくなっている。このように、ブシネスクモデルでは、地形の特徴を考慮した波浪特性を広範囲かつ詳細に算定できることが確認された。



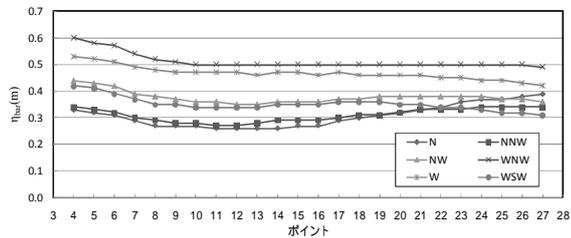
(a) 護岸法線上の各波浪諸元の出力点



(b) 有義波高 (短周期波成分)



(c) 有義波高 (長周期波成分; サーフビート)



(d) 平均水位上昇量

図-3.15 護岸法線上で算定された波浪諸元 (全波向)

ここで、以上に示したブシネスクモデルによる設計諸元の算定結果では、沖からの進行波によって出現する波浪諸元を求めるために、臨港道路護岸地形による反射波の影響は一切考慮されていない。しかし、2章で概説したように、リーフ上護岸の設計水深を求める際に考慮するサーフビート波高は、重複波高として考慮される必要がある。

そこで、別途、護岸有りの計算を実施し、サーフビート波高に関して、護岸無しとして算定される進行波の波高と、護岸有りとして算定される重複波の波高にどのような関係があるかについて、護岸前面の平均水位上昇量とともに確認した。

表-3.10 護岸の有無による各算定値の比較

(a) サーフビート波高比の平均値

$H_{L1/3}$	N	NNW	NW	W	WSW	WNW	平均
平均	2.09	1.93	2.10	1.94	2.45	1.96	2.08

(b) 平均水位上昇量比の平均値

bar	N	NNW	NW	W	WSW	WNW	平均
平均	0.93	0.95	1.02	0.98	0.96	1.00	0.97

表-3.10は、護岸前面の各出力地点(図-3.12のP4~P27)で算定されたサーフビート波高と平均水位上昇量について、“護岸有り/護岸無し”として算定した値の比を、波向き毎に平均した結果を示したものである。これより、平均水位上昇量については、護岸有りと護岸無しで特に有意な違いは認められない(±5%以内)。しかし、サーフビート波高は、護岸からの反射波が重なり重複波が形成された影響により、各波向きで若干差があるものの、重複波高は進行波高の約2倍になると考えてよさそうである。ところで、2章の式(3)では、この関係を係数 b で表わし、 $b=2$ と想定したが、これらの結果より、この仮定はほぼ妥当であったことが確認された。

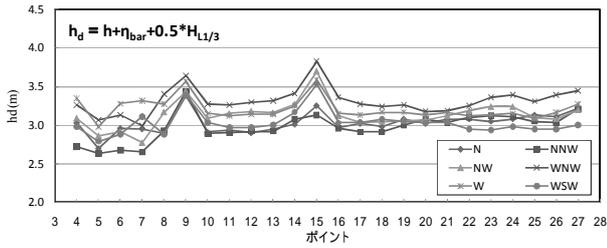
ブシネスクモデルによる波浪変形計算を行い、設計水深の算定に必要なサーフビート波高を算定する際には、より厳密には、ここで実施したように護岸有りとした重複波を直接算定すべきである。しかし、この場合には、進行波としてのみ算定する場合に比べ、2倍の計算ケースを必要とし、かなり不経済となることが懸念される。そこで、実務上は、進行波と重複波の関係を $b=2$ とし、サーフビート波高についても進行波を対象として実施される波浪変形計算の結果から算定することを提案する。

4. リーフ上護岸の設計諸元の算定結果に関する考察

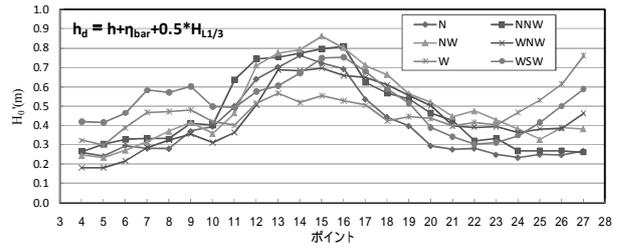
本章では、3章でブシネスクモデルにより算出したリーフ上の波浪諸元をもとに、リーフの設計諸元を算定する。また、従来の設計法でも設計諸元を算出してこれらの比較を行い、それらの結果について考察する。最後に、これらの設計諸元をもとに算定された越波流量を示す。

4.1 設計水深および換算沖波波高

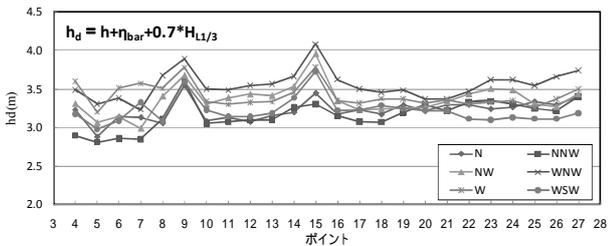
まず、ブシネスクモデルにより算定されたリーフ上の護岸前面の波浪諸元をもとに、合田による越波流量算定図の適用に必要な波浪諸元である、設計水深および換算沖波波高について、2.1節(1)および(2)に述べた手順に従



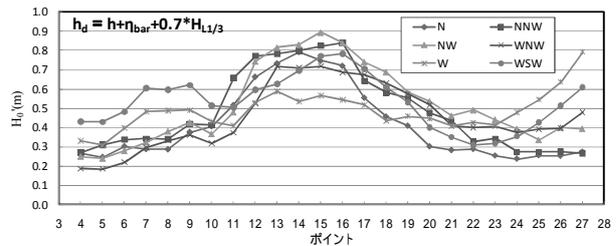
(a) $a=0.5$



(a) $a=0.5$



(b) $a=0.7$



(b) $a=0.7$

図-4.1 ブシネスクモデルで算定した設計水深（全波向）

図-4.2 ブシネスクモデルで算定した換算沖波（全波向）

い算定した．ここで，護岸前面の重複波によるサーフピート波高は，式(3)に従い， $b=2$ として進行波から算定した．また，サーフピート波高に対する水位変動量の割合は， $a=0.5, 0.7$ の2通りとした．

各地点，波向ごとにブシネスクモデルにより算定された設計水深および換算沖波波高を，サーフピート波高の寄与率 a に着目して，それぞれ図-4.1，図-4.2に示す．設計水深，換算沖波波高ともに，その出現傾向は， $a=0.5, 0.7$ とした算定結果に大きな違いはみられない．まず，設計水深については，周辺よりも地盤高が低いP9，P15を除き，リーフの地形特性を反映してほぼ一様となっている．この付近の平均水位上昇量およびサーフピート波高はほぼ一様であるから，この差は地形（すなわち，静水深 h ）に起因するものである．一方，換算沖波波高は，短周期波高と同様に前面にリーフが発達した区間で低く，リーフの切れ目周辺で高くなっている．

ここで，護岸前面で出現するサーフピート波形の特性について考察する．すなわち，本研究では，式(1)~(3)の係数 a の設定値にある程度の幅を持たせつつ， $a=0.5 \sim 0.7$ 程度とすることを推奨している．これは，サーフピート波形の振幅が平均水位を基準に上下対称であると仮定すると $a=0.5$ と設定できるのに対し，宮国ら（2008）は，更なる検討が必要としながらも，断面実験結果をもとに 0.7 と設定すると，合田（1975）による越波流量算定図より推定される越波流量に対し，実験結果がよく一致することを報告していることを踏まえたものである．

とはいえ，実際の設計にあたってはいずれかの数値を

選択して使用することが必要となることは容易に想像される．そこで本稿では，3章で計算されたリーフ上護岸前面のサーフピート波形の特性について若干の考察を加え，今後の係数 a の設定に資することとした．

ここで取り扱うサーフピート波形は，現地リーフ上護岸を対象として，砕波や遡上を考慮したブシネスクモデル（NOWT-PARI Ver5.3）で計算された護岸前面の水位変動データのうち，平均水位上昇量を差し引いた水位変動データに対しフィルタリングを施し，周期 30s 未満の短周期波成分を取り除くことにより抽出された，周期 30s 以上の時系列波形である．ここで，対象とした計算結果は，護岸なし，護岸ありとした両ケースに対するものとした．

まず，最初に，このようにして得られたサーフピート波形の振幅は，平均水位（この場合はゼロ線）に対し，平均的には上下対称であることに注意されたい．また，この波形に対してゼロアップクロス解析を行い有義波高を求めた結果が， $H_{L1/3_I}$ （進行波高）または $H_{L1/3_S}$ （重複波高）である．したがって，サーフピート波形の非対称性が顕著でない場合には，実際に平均水位より上（または下）の水位変動量は波高の半分程度と考えられるため， $a=0.5$ はほぼ妥当な変動量を与えられられる．

一方，サーフピート波形の非対称性が顕著にみられる場合には，一般に，波の谷が浅くなり，波の峯が高くなると考えられる．その結果，平均水位より上の水位変動量は波高の半分よりも大きくなると考えられる．すなわち $a=0.7$ は，上下の水位変動量の比を 7:3 と想定してい

ることに相当する。

ところで、このような波形の非対称性を表すパラメータとして、次式で表わされる歪み度が定義されている。なお、これはもともと、波高頻度分布の左右の非対称性

を表すパラメータとして定義されたものであり、完全に対称の場合は $\sqrt{\beta_1}=0$ 、左側（階級値の小さい方）へ偏る場合は正の値をとる。海の波ではほとんどの場合、 $\sqrt{\beta_1}>0$ となる。

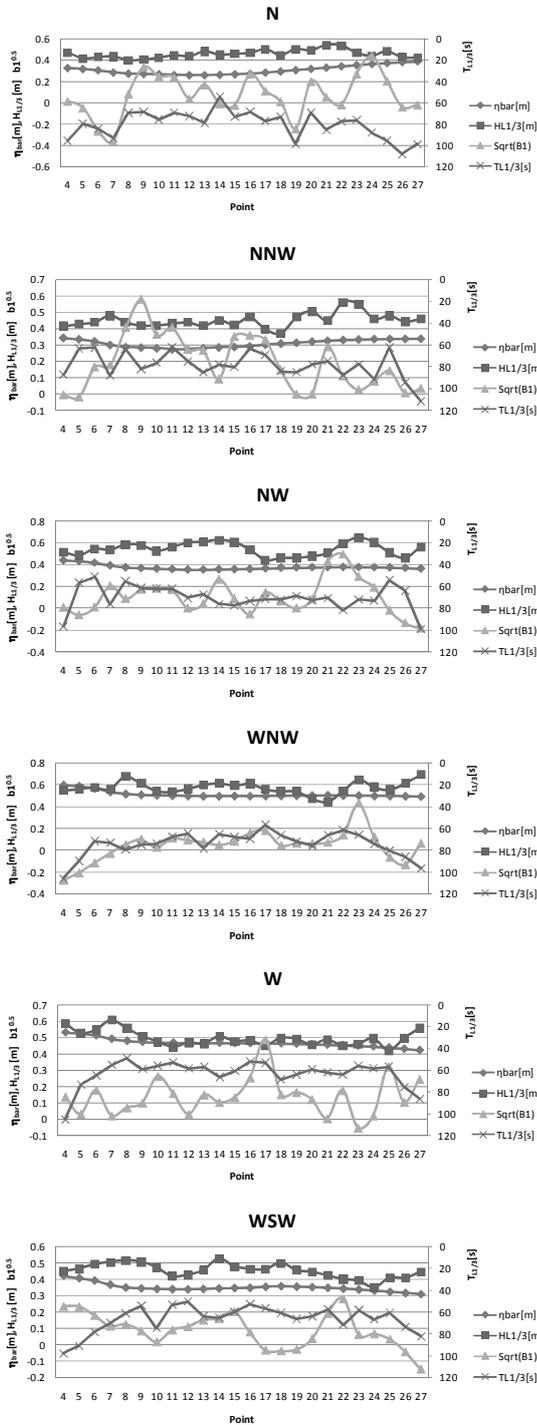


図-4.3 サーフビート（進行波）の波高，周期，歪み度

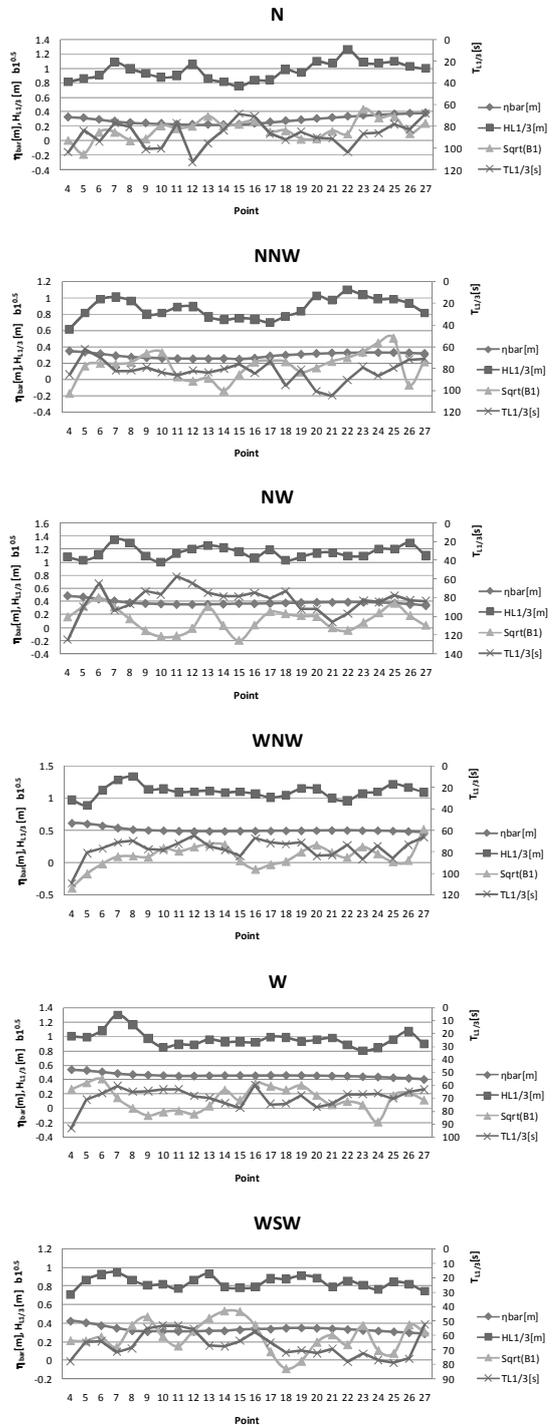


図-4.4 サーフビート（重複波）の波高，周期，歪み度

$$\sqrt{\beta_1} = \frac{1}{\eta_{rms}^3} \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\eta_i - \bar{\eta})^3 \quad (9)$$

そこで、数値計算により得られたリーフ護岸前面の進行波および重複波のサーフピート波形に対し、これを算定した結果を、波高、周期、および最初に差し引かれた波による平均水位上昇量とともに、図-4.3および図-4.4に示す。地点や波向きに依存するものの、進行波および重複波の区別なく、ほぼ $\sqrt{\beta_1}=0\sim 0.5$ 程度の値をとることがわかる。 $\sqrt{\beta_1}$ の値と波形の上下の非対称割合との関係は、著者らの知る限り、必ずしも明らかではないが、リーフ上護岸前面のサーフピート波形は、ほぼ完全な上下対称($a=0.5$)から上方に尖った波形($a=0.7$)までが時空間的に混在しているものと考えられる。

4.2 従来法による算定結果との比較

次に、波向きNNWを対象として、これらの設計水深および換算沖波波高について、高山式で算定された値とブシネスモデルで算定された値を比較する。

ここで、従来法による設計諸元の算定手順のうち、リーフ内外の波高手順は、図-4.5に模式的に示す方法に従うものとした。すなわち、本研究で“従来法”と記した方法では、リーフ先端までの波浪変形計算はブシネスモデルを用いて行い、リーフ先端から岸側のリーフ上では高山式を用いて算定する。しかし、高山式は本来、一次元的な波浪場を想定して提案されたものであるため、平面リーフ地形への適用にあたっては、リーフ上の波高分布を算定する“方向”を設定する必要がある。通常、これはリーフエッジ等での波の屈折を考慮し、対象護岸ごとに、リーフ上での来襲波の伝播方向に設定されるべきであるが、本研究では、簡便のため、これを護岸法線に対して直角方向と仮定した。

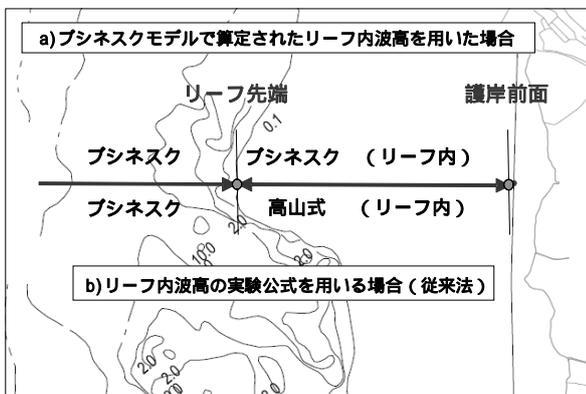
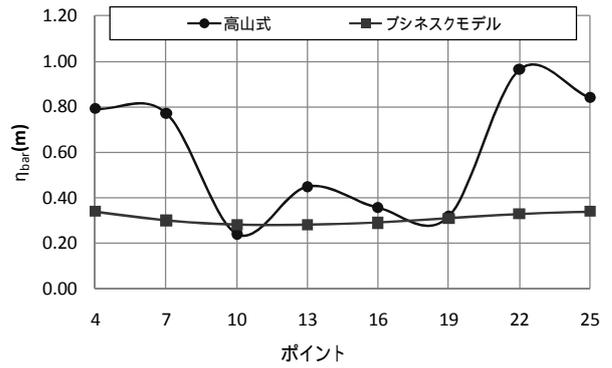
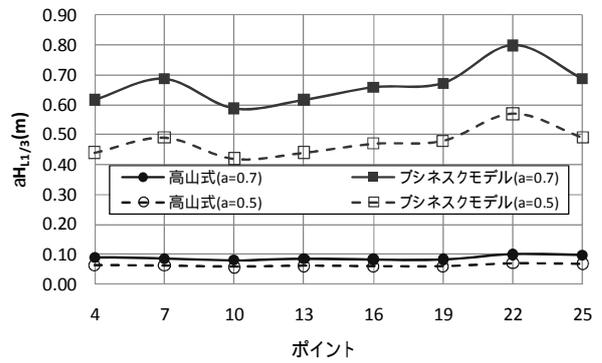


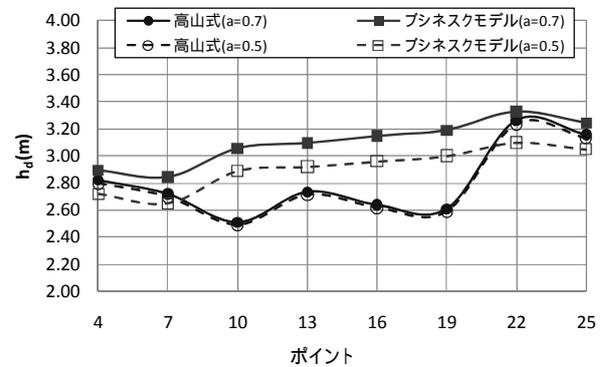
図-4.5 リーフ周辺およびリーフ上の波浪変形計算手順



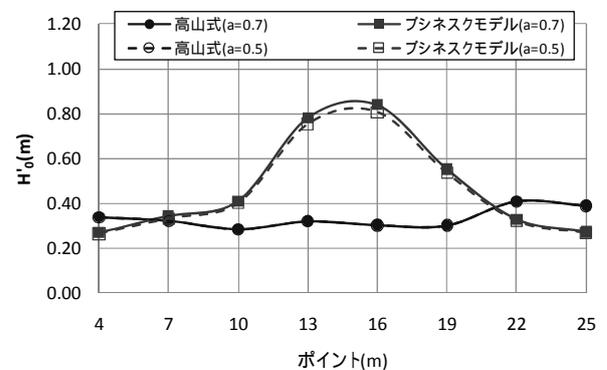
(a) 平均水位上昇量



(b) サーフピートに伴う水位変動量



(c) 設計水深



(d) 換算沖波波高

図-4.6 リーフ上護岸の設計諸元の算定結果 (NNW)

このようにして算定した従来法による平均水位上昇量，およびサーフビート波高に伴う水位変動量を，ブシネスクモデルによる算定結果と合わせて図-4.6(a)および図-4.6(b)に示す．ただし後者では，係数 a の違いによりそれぞれ2通りの結果を示している．また，同様に，設計水深および換算沖波波高を算定した結果を，図-4.6(c)および図-4.6(d)に示す．

まず，図-4.6(a)からわかるように，従来法では，護岸前面のリーフが長い地点で平均水位上昇量が大きく，短い地点で上昇量が小さい．それに比べ，ブシネスクモデルで算定された平均水位上昇量は，護岸法線上の地点によらずほぼ一定で，かつリーフが短い地点における平均水位上昇量は，従来法で算定された値にほぼ一致する．

次に，図-4.6(b)に着目すると，サーフビートによる水位変動量は，従来法，ブシネスクモデルともに，地点による違いはそれほど大きくない．しかし，ブシネスクモデルにより算定された値は，従来法によるものに比べ約30～50cm程度大きいことがわかる．なお，係数 a による算定結果の違いは，概ね20cm程度であった．

さらに，これらの結果を合成した設計水深に着目すると，図-4.6(c)より，結果的に両算定法による設計水深の違いはそれほど大きくないことがわかる．特に前面のリーフが長い地点では，サーフビートによる水位変動量の差異が平均水位上昇量の差異に相殺されて，両者はほぼ一致している．このように，ブシネスクモデルで算定される平均水位上昇量は，従来法に比べ，特に前面にリーフが大きく広がる海域で小さくなる傾向がある．一方，サーフビートによる水位変動量は，従来法で算定された値に比べ，総じて大きくなる傾向がある．これらの結果，両者の和で評価される静水深に対する設計水深の増加分は，今回の場合，結果的に両算定法でほぼ同等となった．一方，両計算法による換算沖波波高の算定結果を，同様に係数 a による違いを考慮して，図-4.6(d)に示す．図よりわかるように，護岸前面のリーフが長い地点では，ブシネスクモデルにより算定された換算沖波波高は，従来法による算定結果とほぼ同様である．しかし，護岸前面のリーフが短い地点では，ブシネスクモデルによる算定結果は従来法よりも60cm程度大きくなっている．換算沖波波高の変化傾向は護岸前面波高のそれと相関が高いと考えられるので，このような結果が算定された原因は，リーフ上における波高減衰過程の計算結果の違いにあると考えられる．そこで，以下では，従来法による設計諸元を算定する際，高山式を適用するために設定した代表断面を利用して，リーフ上波高分布に関する両者の計算結果を切り出し，より詳細な考察を加えた．

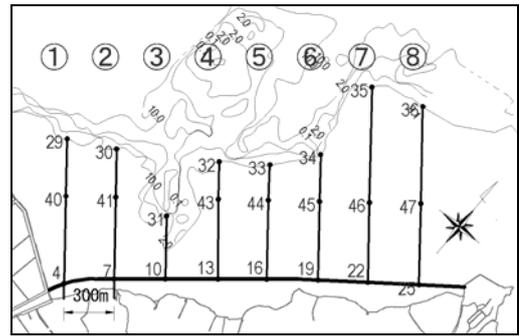


図-4.7 高山式を適用した断面および出力地点の定義

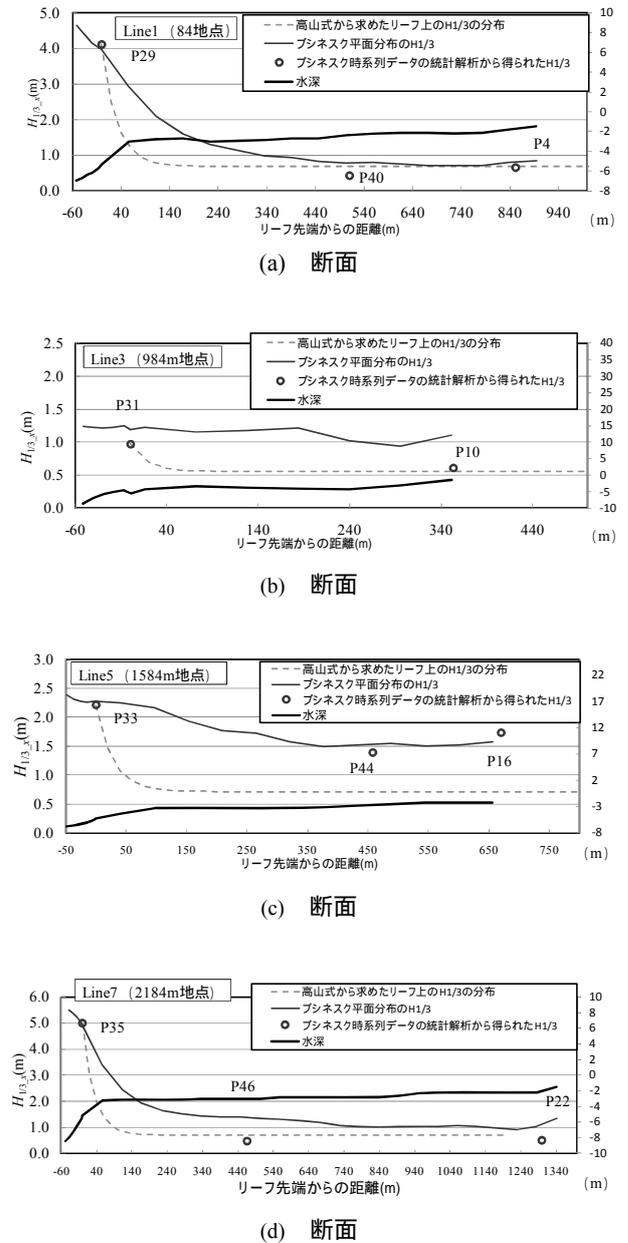
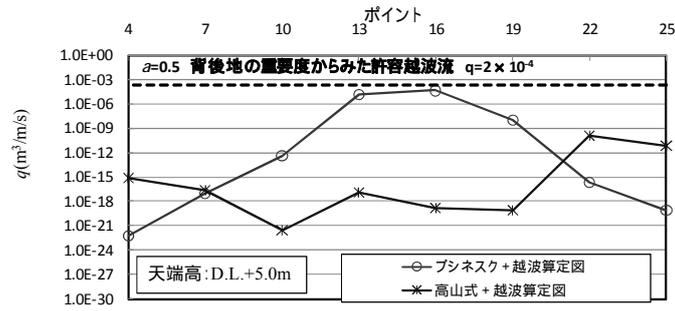
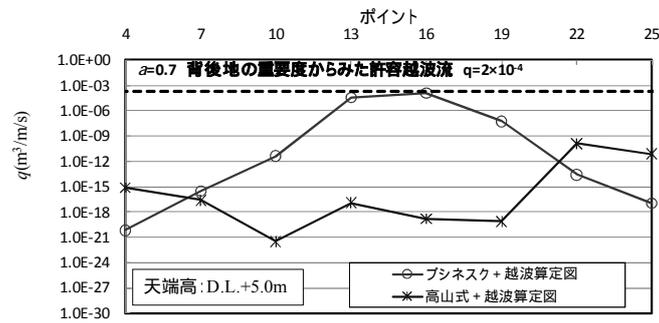


図-4.8 リーフ上波高の算定結果の比較 (NNW)

ブシネスクモデルを用いて算出したリーフ上護岸の設計諸元に関する考察

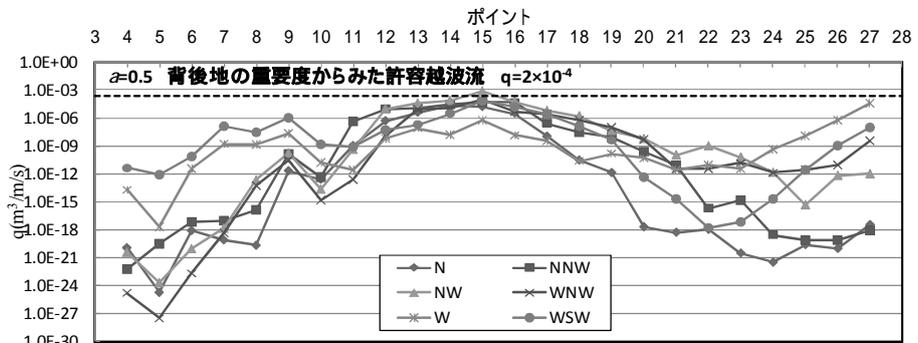


(a) $a=0.5$

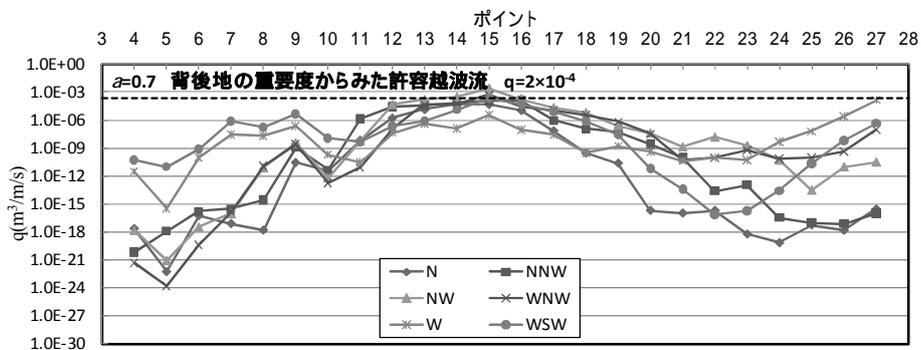


(b) $a=0.7$

図-4.9 リーフ上護岸の設計諸元を用いた越波量算定結果の比較 (NNW)



(a) $a=0.5$



(b) $a=0.7$

図-4.10 ブシネスクモデルによるリーフ上護岸の設計諸元を用いた越波量算定結果 (全波向)

すなわち、図-4.7に示すように、各リーフ上護岸前面において、リーフ先端、リーフ上、護岸前面地点を結び断面（Line）を設定し、高山式およびブシネスクモデルにより算定される、リーフ上の波浪減衰過程の特徴を確認した。なお、図中の丸囲み数字は各断面（Line）の番号を、それ以外の数字は水位変動データの出力地点番号を表す。このうち、代表的な断面、（Line1, 3, 5, 7）での結果を抽出したものを、図-4.8に示す。図は、横軸にリーフ先端からの距離、縦軸に波高を表している。ここで、高山式では、断面上の各地点で算定した波高を破線で示し、ブシネスクモデルでは、平均波高からの換算値として得られる有義波高分布を各断面で切り出し、それを実線で示すとともに、代表地点で出力した水面波形を統計解析して得られる短周期波高を白抜丸印でプロットした。ただし、ブシネスクモデルにおいて平均波高から有義波高を換算する際には、その地点における波高頻度分布がほぼレーリー分布で表わされることを前提としている。したがって、この波高頻度分布が扁平化する砕波帯内では、換算精度が劣化し、ゼロクロス解析によって直接算定される有義波高よりも大きめの値をとることに注意が必要である。これらを踏まえ、以下、結果を考察する。

まず、これらの断面における両者の波高分布を比較すると、総じて、ブシネスクモデルで計算された各断面に沿う波高減衰の程度は、高山式に比べ比較的緩やかな傾向にあることがわかる。これは、有義波高換算に伴う過大評価を見込んでなお十分に有意である。すなわち、断面1次元のリーフ地形上の波高減衰過程を近似した高山式では、リーフエッジで生じた砕波のために急激に波高が減衰する。しかし、平面2次元のリーフ地形上の波高分布のある断面で切り出したブシネスクモデルによる算定結果では、砕波によって波の進行方向に生じる波高減衰に、周辺のリーフエッジ等から伝播する波高が重畳するため、より滑らかな減衰過程が算定されたと推測できる。例えば、Line5では、その沖側端に波向きNNWの入射波が到達するまでに複数のリーフエッジを経由するため、その傾向がより顕著に現れている。しかし、ちょうどリーフの切れ目に位置するLine3では、水面波形を統計解析して得た有義波高値とのずれが大きく、有義波高換算の影響が顕著に現れたと考えられる。この原因としては、凹レンズに似た効果により、周波数の異なる成分波がそれぞれ屈折し、特異な波高頻度分布が形成された可能性が高いと考えられる。なお、このときリーフ上で得られた統計解析による有義波高は、高山式による算定結果と比較的よく一致している。

一方、非常に長いリーフが続くLine1およびLine7では、ブシネスクモデルにより算定されるリーフ上波高（白抜丸印）は、高山式の値よりも20cm程度小さい。逆にいうと、これは非常に長いリーフ奥では高山式による値のほうが大きいことを意味する。すなわち、高山式では、一般に、リーフエッジの内側数十から百数十メートルくらいまでの区間で急激に波高が減衰し、それ以降はずっと一定値をとる。これらは近似式の特性によるものであるが、このため、このようなリーフ上の波高減衰は、高山式において逆に過小評価（波高値としては過大評価）されている可能性があることに注意する必要があると考えられる。

なお、広いリーフ上での波高減衰に関するブシネスクモデルの計算精度については、臨港道路護岸前面リーフに隣接する那覇空港周辺リーフ上で得られた水位変動の観測結果に対する再現計算を行い、検証した。この詳細を付録Bに示す。

最後に、このようにして求めたリーフ上護岸に対する両者の設計諸元を用いて、合田による越波流量算定図より各地点における越波流量を推定した結果を、係数 a の違いを考慮して図-4.9に示す。換算沖波高の算定結果の違いを反映して、両算定法により推定される越波流量は、リーフの切れ目付近に位置し、前面リーフ長が短い護岸において、両者の差が大きくなっている。一方、ブシネスクモデルによる算定結果において、サーフビート波高に乗じる係数 a による越波流量の違いは、このなかで越波流量が最も大きいP16において、約2.7倍であった。

また、本研究で提案したブシネスクモデルを用いた場合に算定される各波向きでの越波流量を、重ねて図-4.10に示す。ここで、図中の破線は、護岸直背後の歩行者（50%安全度）に対する許容越波流量（ $2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m/s}$ ）を示している。これによると、P15に波向きNWの設計波が入射した場合に、全波向きに対するすべての地点のなかで最も越波流量が大きくなり、サーフビート波高に乗じる係数 a に関わらず、許容越波流量を僅かに上回ると推定される。また、このとき、 $a=0.7$ として推定される護岸越波量は $a=0.5$ とした場合の約3.4倍である。これは、護岸越波量の推定に用いた越波流量算定図における真値の想定範囲（直立護岸において 10^{-4} オーダーの無次元越波流量に対し0.2~3倍）には収まっていないため、これらの差異は、ある程度有意なものと推測される。

5.まとめ

本研究では、浅瀬やリーフといった複雑な海底地形で

の波浪変形特性を精度良く計算できるビジネスモデル (NOWT-PARI, Ver5.3) を用いて、リーフ上護岸の設計諸元をより厳密かつ効率よく算定する方法を提案した。これにより、リーフ上の波浪特性を考慮した護岸の設計が可能となった。さらに、具体的なリーフ上護岸を対象として、本研究で提案する算定法を適用した設計諸元の算定例を示し、これらを従来の方法による算定結果と比較することにより、本研究で提案する算定手法の実務への適用性について検証した。主な結論を以下に示す。

ビジネスモデルは時々刻々と変化する水位変動を再現する計算モデルの特性上、非常に長い計算時間を要する。そこで、平山・宮里 (2009) による、エネルギー平衡方程式法によるスペクトル算定結果を直接入力する造波法を導入することにより、領域をできる限り小さくし、計算時間を短縮することに成功した。また、護岸前面で形成される進行波と重複波のサーフビート波高の関係を仮定し、その妥当性を検証することにより、計算ケース数を最大1/2に抑制できることを示した。

現地リーフ地形を対象としたビジネスモデルによる波浪変形計算を実施することにより、リーフ周辺およびリーフ上で生じる平面的な波浪変形を考慮した上で、リーフ上護岸前面の有義波高や平均水位上昇、サーフビート波高などを算定できることを確認した。さらに、これらを用いて、リーフ上護岸の設計に必要な設計水深および換算沖波高を算定した。これらは、一次元的な砕波減衰が考慮された、高山らによる実験公式を利用した従来のリーフ内波高の算定法に比べ、周辺のリーフエッジ等から伝播する波による波高変化や、非常に長いリーフ上での緩やかな波高減衰を考慮することができるなどの特徴から、より妥当な結果を与えていると推測された。

設計水深の算定時に考慮されるサーフビート波高の寄与率は、今後更なる検討が必要であるものの、暫定的には $a=0.5 \sim 0.7$ 程度とすることが推奨される。すなわち、本研究で対象としたリーフ上護岸の越波流量をそれぞれの値を用いて推定したところ、両者の差異は、越波流量算定図における真値の想定範囲を僅かに超えているという点で、ある程度有意なものであった。

6. あとがき

本研究の成果により、港湾・海岸における設計の実務にすでに広く適用されているビジネスモデルが、今後、リーフ上の波浪特性を考慮した護岸の設計諸元の算定にも活用され、実務での設計をより確実かつ効率的に実施することができれば幸いである。しかしながら、本研究

で示した算定結果のうち、設計諸元を用いて推定されたリーフ上護岸の越波量に対しては、未だ模型実験結果や現地観測結果等を用いた検証は実施されていない。今後、これらを実施する機会を得て、リーフ上護岸の設計手法の精緻化に努める必要があると思われる。

(2009年4月21日受付)

謝辞

本研究を行うにあたり、沖縄県浦添市土地開発公社ならびに内閣府沖縄総合事務局那覇港湾空港整備事務所から、港湾地形データ、海象条件に関する資料等をご提供いただくとともに、港湾計画のあらましについてご教示いただきました。また、(株)日本港湾コンサルタントの田中和広氏には、波浪変形計算にかかるデータ作成をご担当いただきました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 川崎浩司・菊 雅美・笹田泰雄・眞栄里和也・内間安治・嶋田 宏・五味久昭・三浦健悟・柴田哲郎 (2008): 海底地形と護岸形状が及ぼす規則波 / 不規則波動場での海岸護岸の越波特性, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.831-835.
- 合田良実 (1975): 浅海域における波浪の砕波変形, 港研報告第14巻, 第3号, pp.59-106.
- 合田良実・岸良安治 (1975): 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 港研報告第14巻, 第4号, 44p.
- 首藤伸夫 (1974): 非線形長波の変形 - 水路幅, 水深の変化する場合 -, 第21回海岸工学講演会論文集, pp.57-63.
- 高山知司・神山 豊・菊池 治 (1977): リーフ上の波の変形に関する研究, 港研資料No.278, 32p.
- 高山知司・永井紀彦・西田一彦 (1982): 各種消波高による越波流量の減少効果, 港研報告第21巻, 第2号, pp.151-205.
- 高山知司・永井紀彦・西田一彦・関口忠志 (1984): 斜め入射不規則波を用いた護岸の越波特性実験, 第31回海岸工学講演会論文集, pp.542-546.
- 高山知司・池田直太・平石哲也 (1991): 砕波および反射を考慮した波浪変形計算, 港研報告第30巻, 第1号, pp.21-67p.
- 平石哲也 (1992): 多方向不規則波の発生とその応用に関する研究, 港研資料No.723, 176p.
- 平山克也・平石哲也 (2001): ビジネスモデルにおける

透水層を用いた任意反射境界処理法の開発，港研報告第40巻，第1号，pp.3-30.

平山克也（2002）：非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究，港研資料No.1036，162p

平山克也・平石哲也（2004）：ブシネスモデルによる碎波・遡上計算法とその適用性，海岸工学論文集，第51巻，pp.11-15.

平山克也・平石哲也（2005）：平面2次元ブシネスモデルによる碎波・遡上計算法の開発と現地適用，海岸工学論文集，第52巻，pp.11-15.

平山克也・長谷川準三・長谷川巖（2006）：越流を考慮したブシネスモデルによる不規則波の越波量に関する数値計算，海岸工学論文集，第53巻，pp.706-710 .

平山克也（2008）：ブシネスモデルを活用した高精度港内静穏度解析法の提案，海岸工学論文集，第55巻，pp.796-800 .

平山克也・宮里一郎（2009）：任意形状スペクトルによる多方向不規則波の造波法の提案，港空研資料，予定

宮国敏秋・又吉昭太・仲座栄三・宇座俊吉（2008）：リーフ上の護岸越波に関する研究，海洋開発論文集，第24巻，pp.951-955.

記号表

a	: サーフビート波高による水位上昇量の割合
b	: 重複波と入射波の比
d	: 代表径
$dt, \Delta t$	: タイムステップ
f	: 方向分布関数
h	: 静水深
h_d	: 設計水深（護岸前面水深）
$H_{1/3}$	: 短周期波高
$H_{L1/3}$	: サーフビート有義波高
$H_{L1/3_1}$	: サーフビート有義波高（進行波）
$H_{L1/3_S}$	: サーフビート有義波高（重複波）
H_0'	: 換算沖波波高
K_s	: 浅水係数
N_s	: 成分波の個数
$\tan\theta$	: 海底勾配
α	: 層流抵抗係数
β	: 乱流抵抗係数
η_{bar}	: 平均水位
θ	: 波向
λ	: 空隙率
ζ_{rms}	: サーフビート水位の2乗平均値

付録A ブシネスクモデルによる波浪変形計算結果
(図面集)

本文に記載できなかった計算領域，波高分布図等の図を以下に示す。

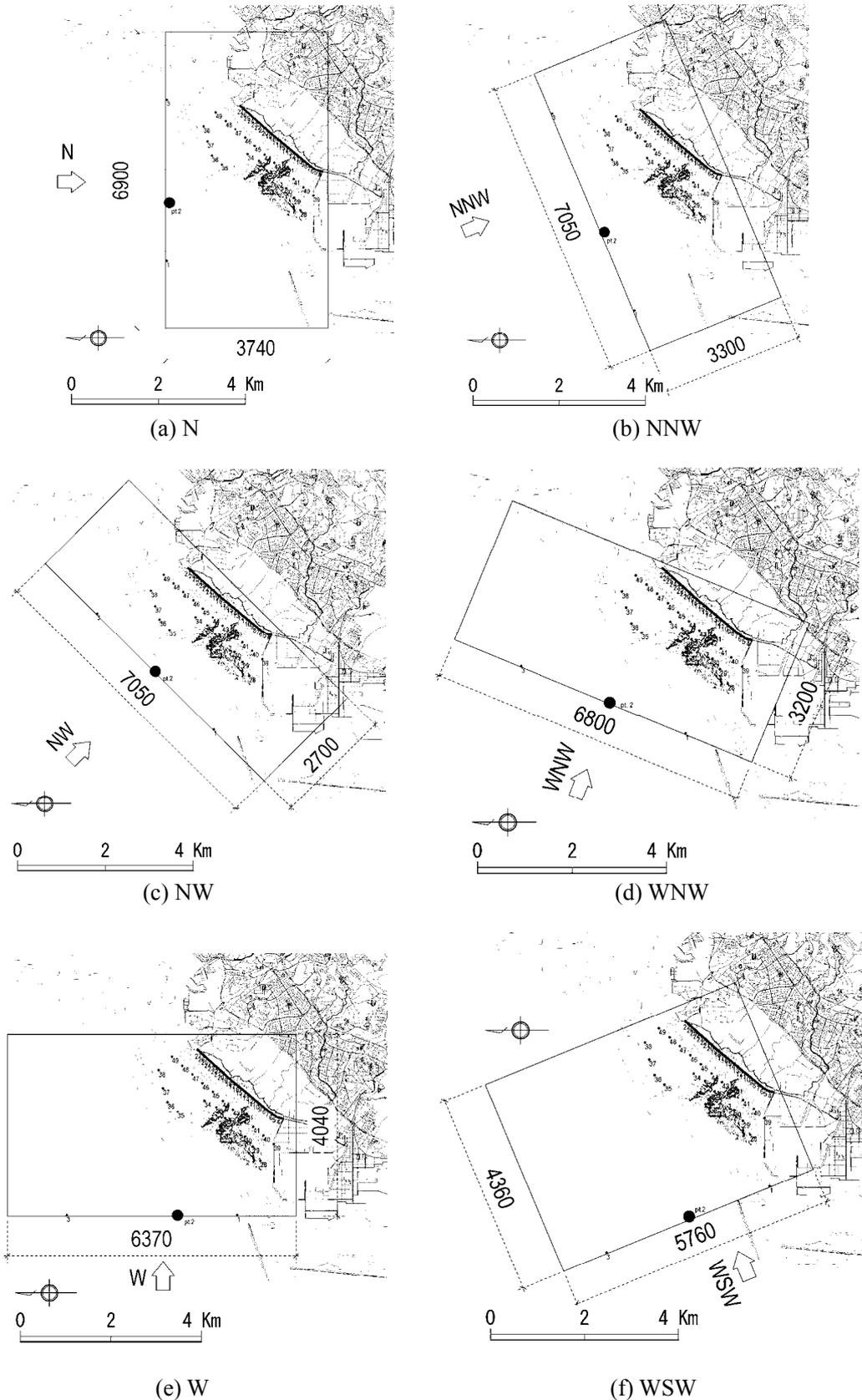


図-A.1 NOWT-PARI の入射波境界と計算領域

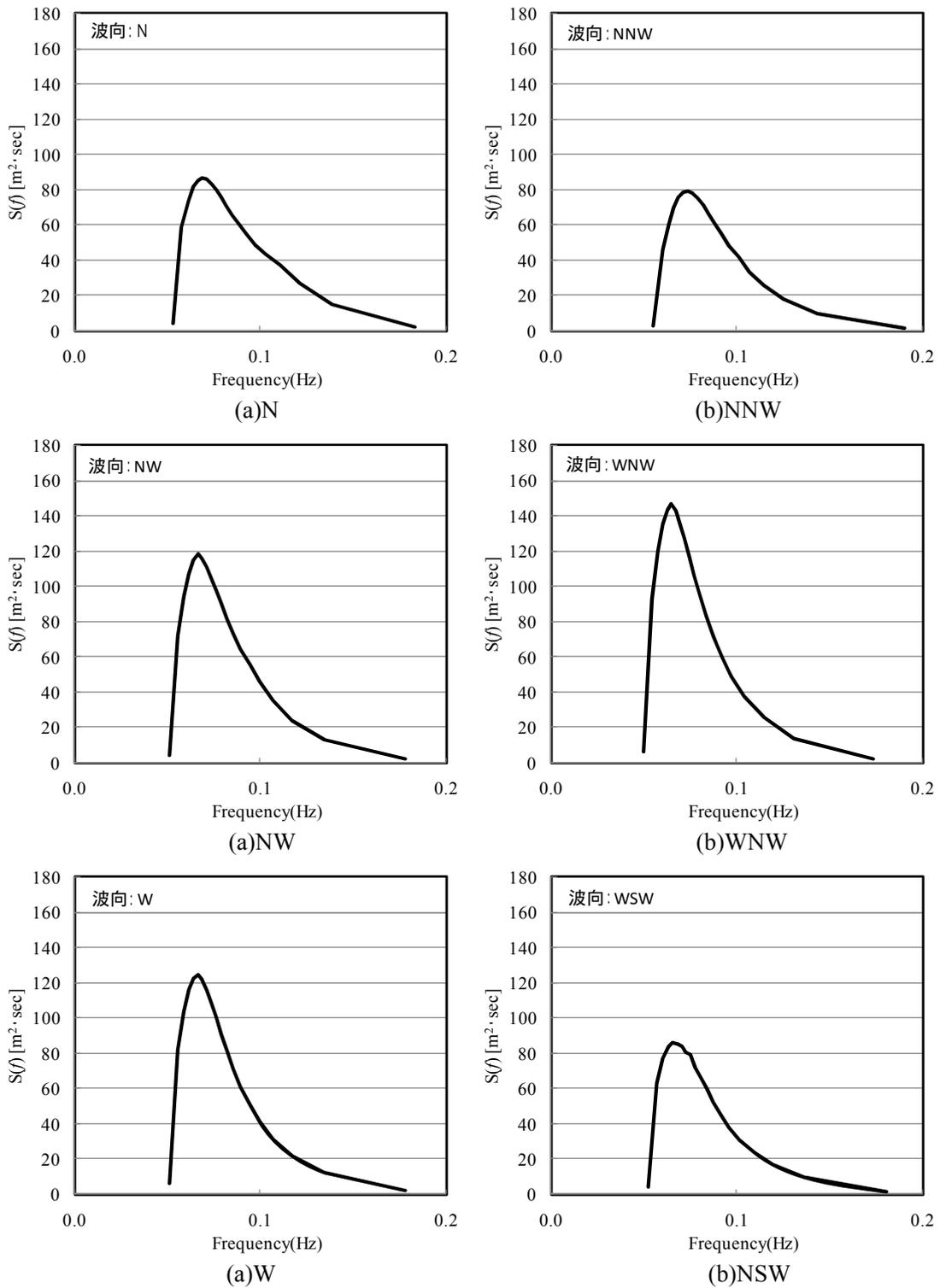


図-A.2 エネルギー平衡方程式による周波数スペクトル計算結果

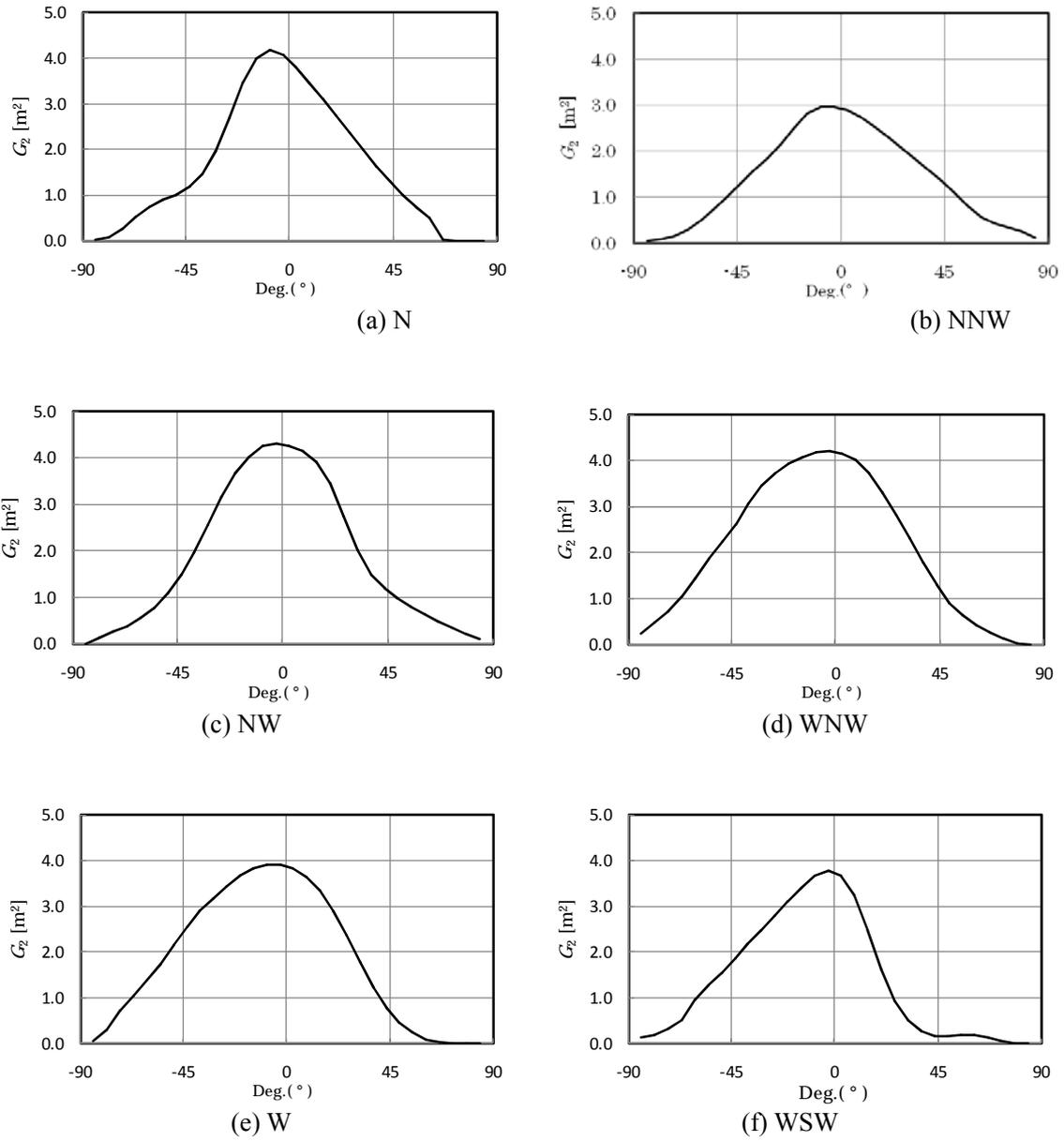


図-A.3 エネルギー平衡方程式による方向スペクトル計算結果

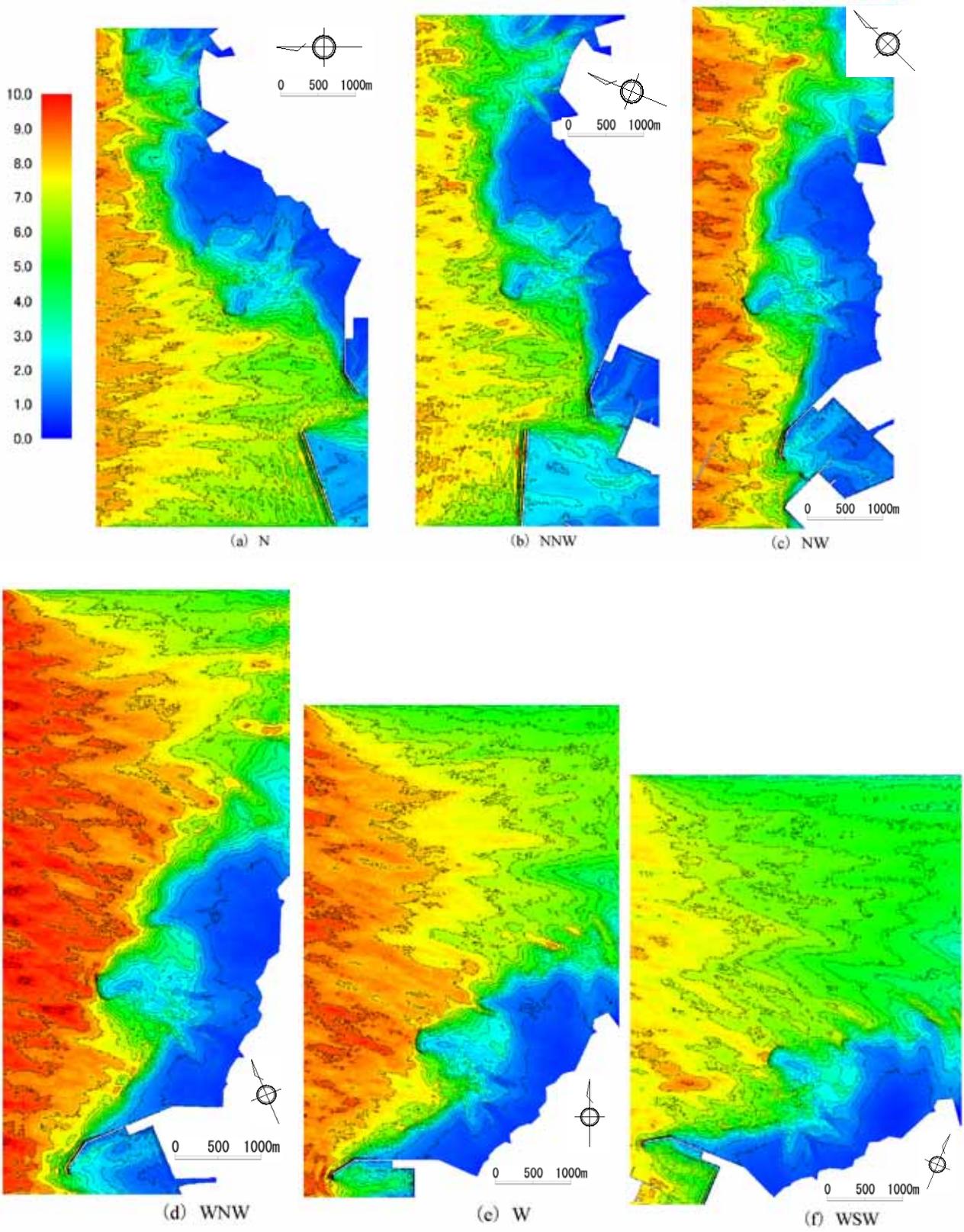


图-A.4 波高分布图

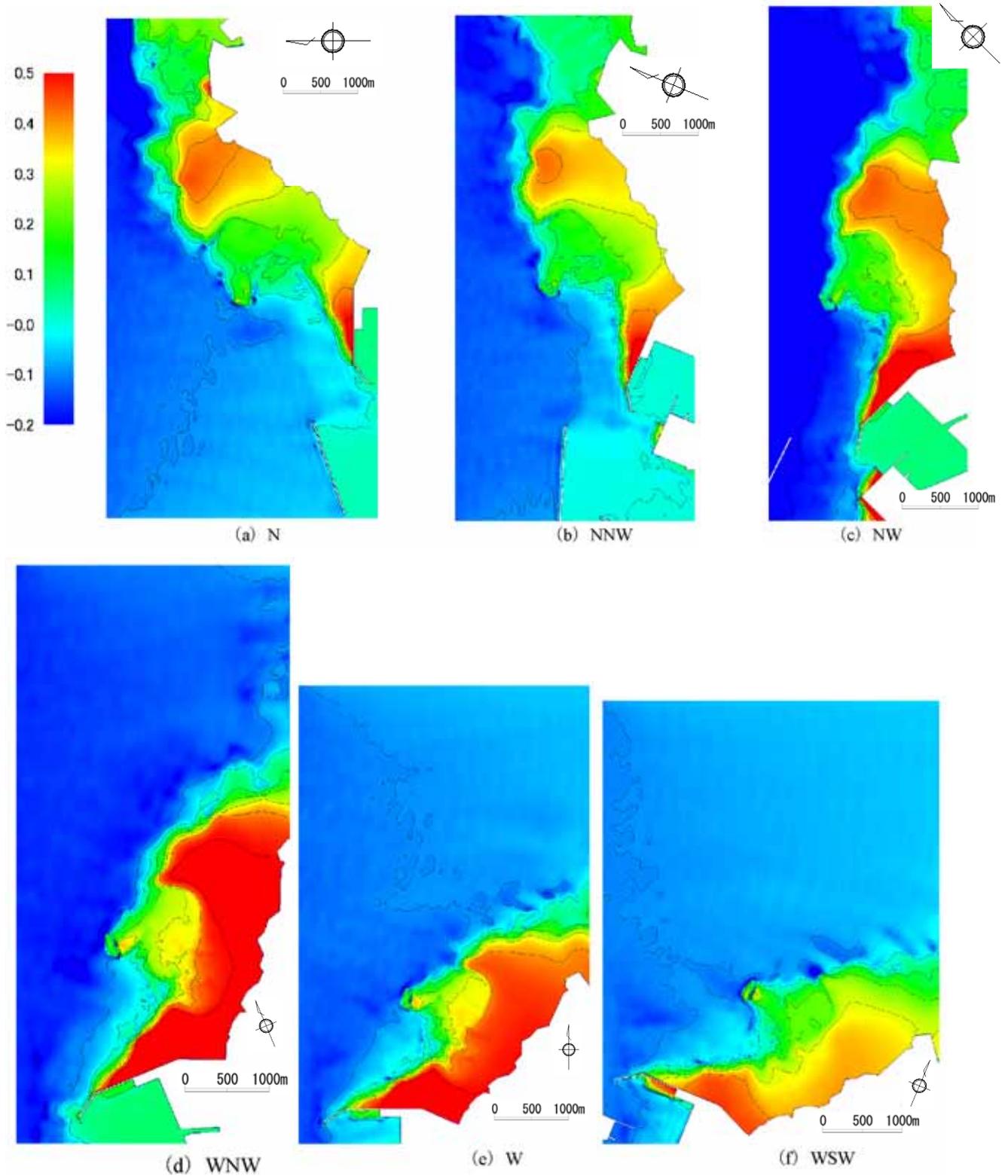
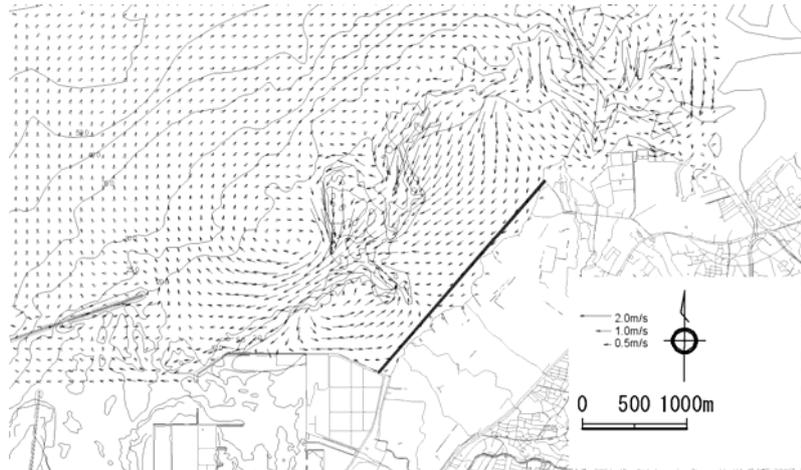
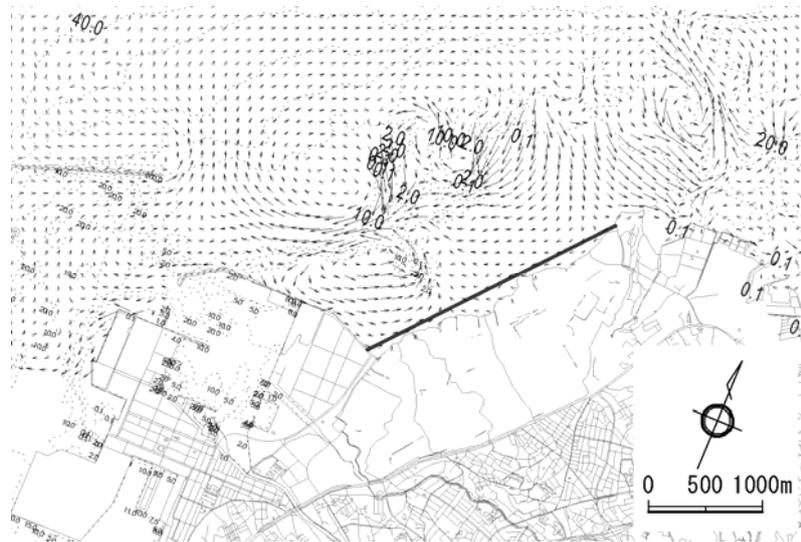


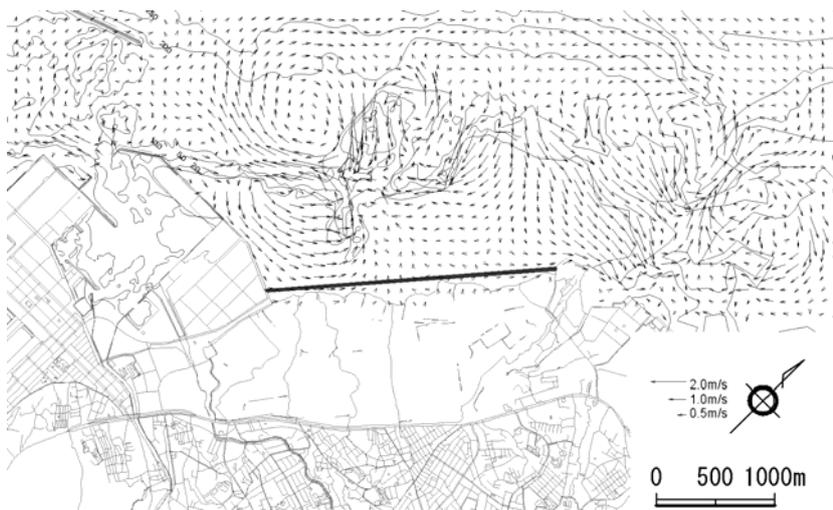
図-A.5 平均水位分布図



N

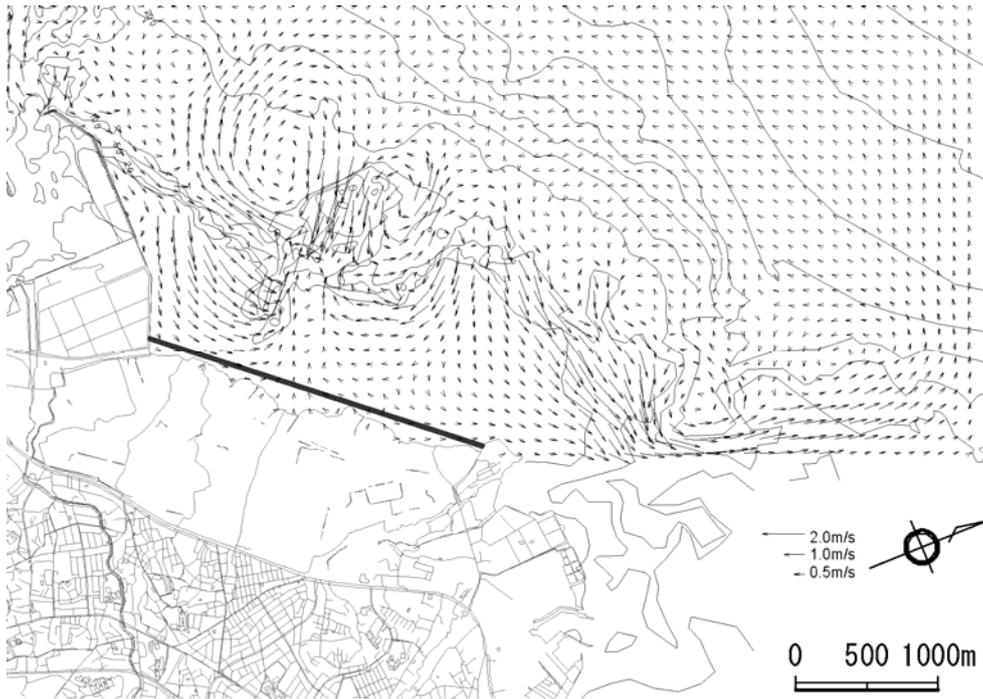


NNW

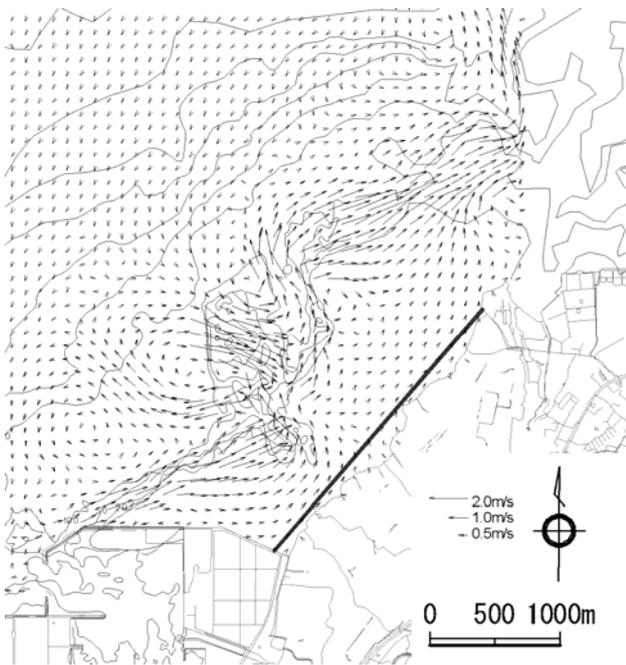


NW

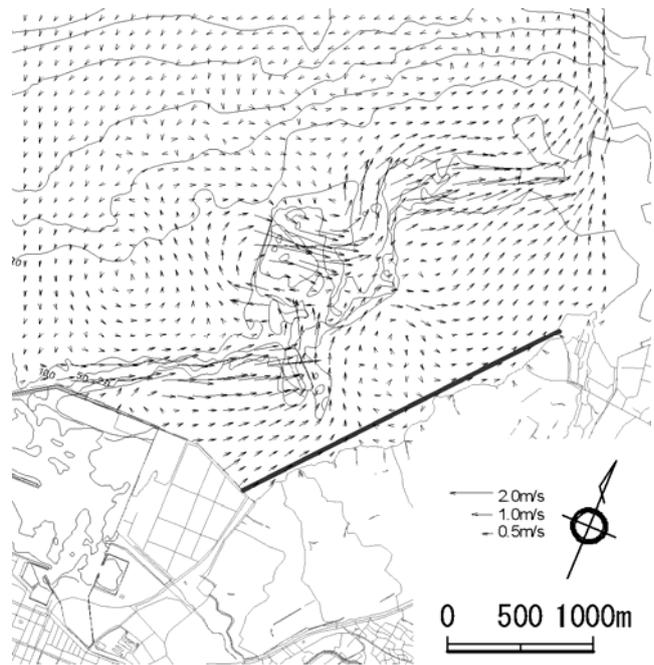
図-A.6 流速ベクトル図(1)



WNW



NW



WSW

図-A.7 流速ベクトル図(2)

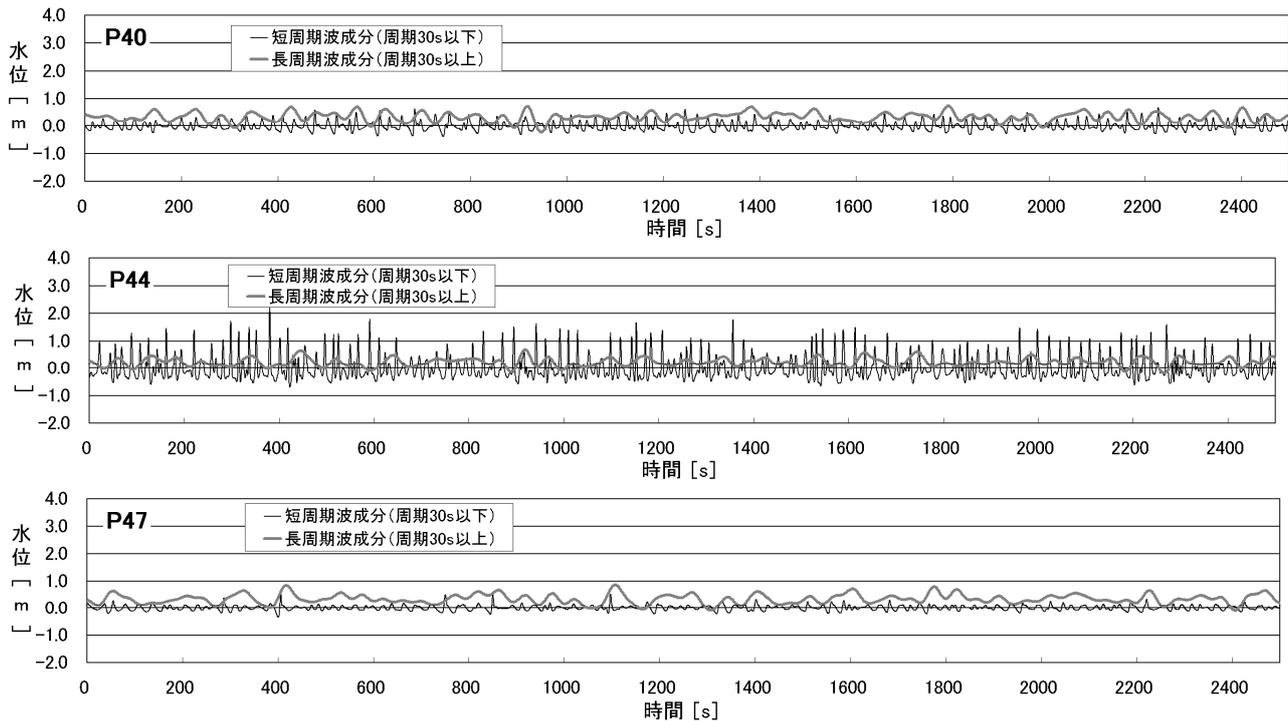
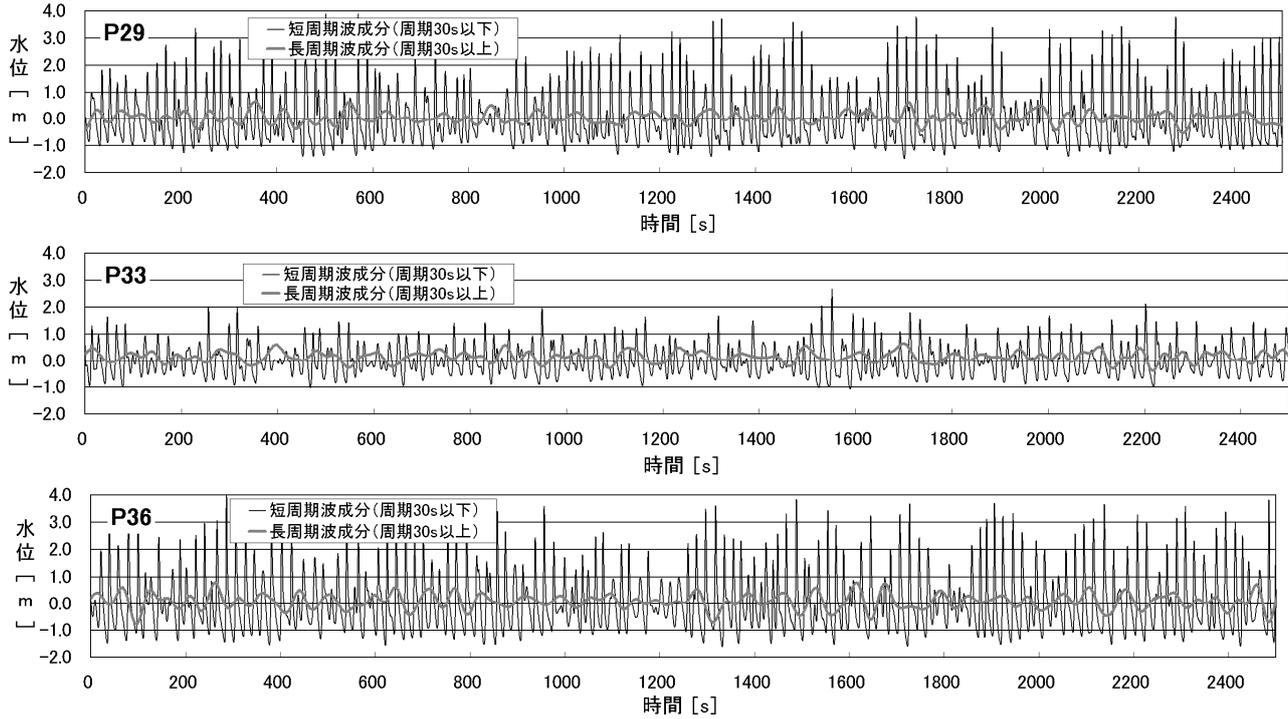
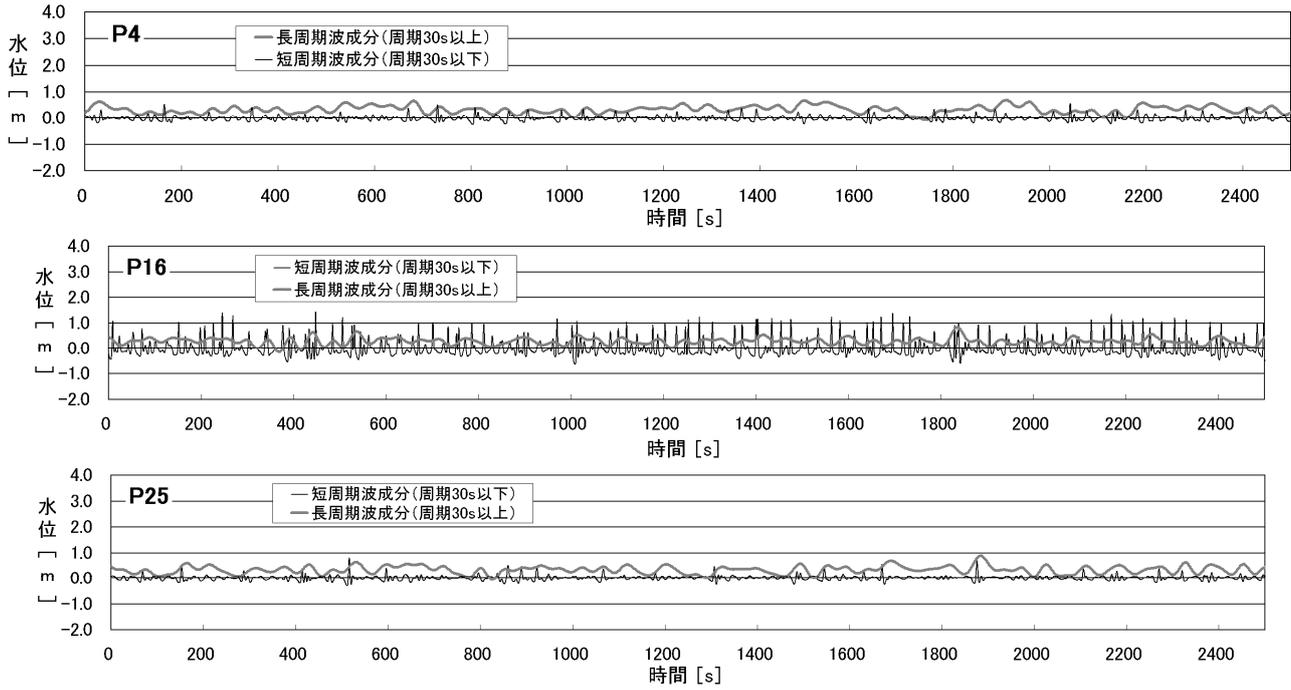


図-A.8 NNW 水位変動分布(1)

ブシネスモデルを用いて算定したリーフ上護岸の設計諸元に関する考察



(c) 護岸法線上 (P4, P19, P25)

図-A.9 NNW 水位変動分布(2)

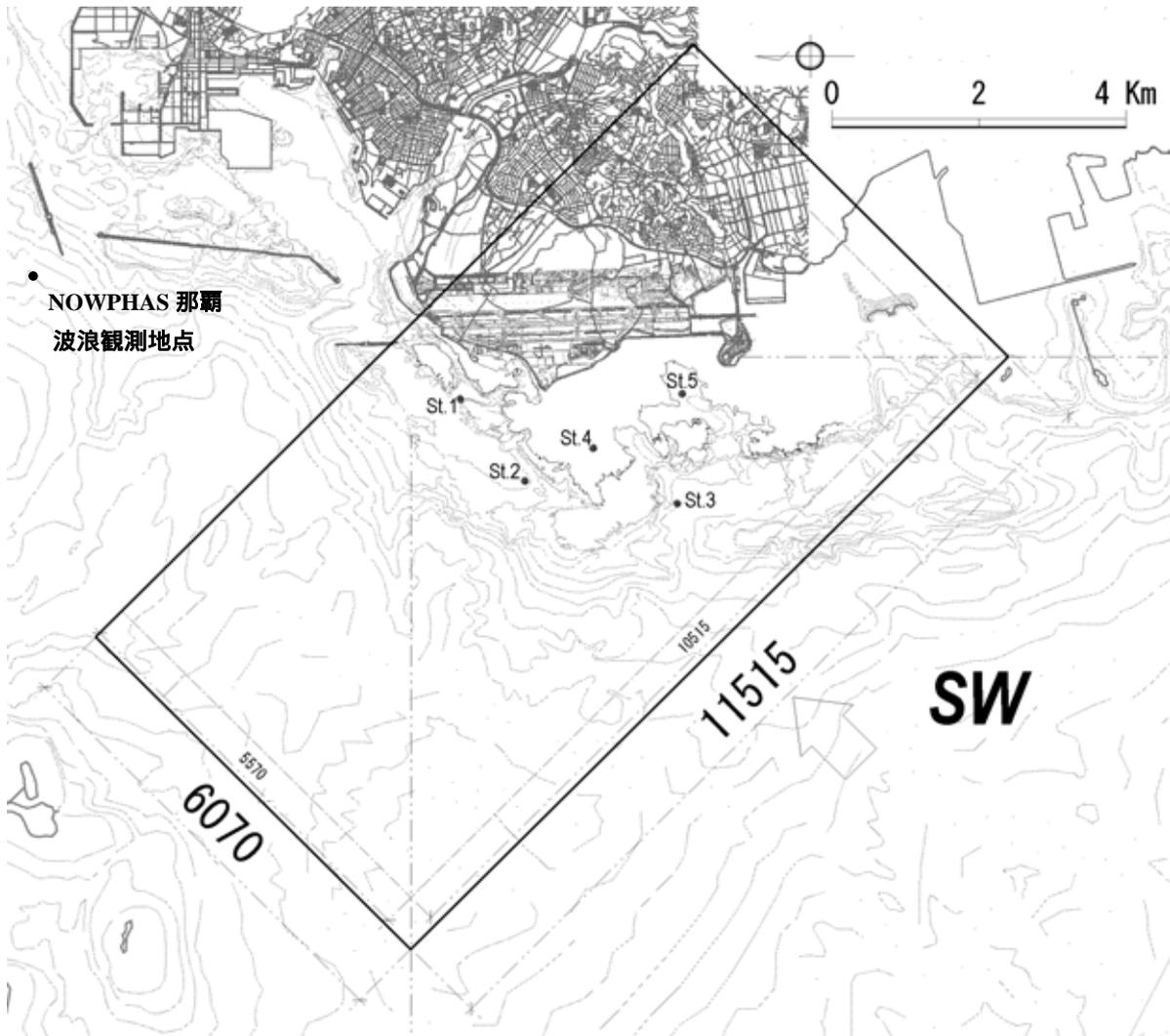
付録B 広いリーフ上での波高減衰に関するブシネスモデルの計算精度について

ここでは、前面に広いリーフが広がる臨港道路護岸前面の波浪場を、本編 2.3 節で概説したブシネスモデル (NOWT-PARI Ver5.3) を用いて算定した際の計算精度について検討するために、臨港道路護岸前面リーフに隣接する那覇空港周辺リーフ上で得られた、水位変動の観測結果に対する再現計算を行った。

対象とした海域を、計算領域 (四角枠) および現地波浪観測点 (黒丸) とともに、付図-B.1 に示す。図では、中央より上方に対象としたリーフ地形 (約 2km × 4km) とその岸側の那覇空港、およびその左上 (北東) に隣接する那覇港を確認できる。なお、浦添臨港道路はこの北東に広がるリーフ上に設置される予定である。

現地波浪観測は、那覇空港周辺リーフの沖側 (St.3)、外縁 (St.1, St.2)、およびリーフ上 (St.4, St.5) の各地点に、超音波式および水圧式波高計とドップラー式流速計を設置して、夏季 (7/15 ~ 8/6) (台風 0807 号来襲時の 7/16 ~ 22、および台風 0808 号来襲時の 7/25 ~ 31 を含む) および冬季 (12/4 ~ 21) に実施された。なお、これらの観測は、台風期および冬季風浪時における那覇空港周辺リーフ地形上の波・流れ場を把握するために実施されたものである。ただし、設置水深が非常に浅い St.4 については、超音波式波高計による水位観測は行われていない。

ここでは、このうちリーフの長手方向から来襲する波向き (SW) が卓越する、夏期の台風来襲時に観測された水位変動データに着目して、リーフ上の波高減衰およびサーフビートの発生・発達状況の再現を試みた。



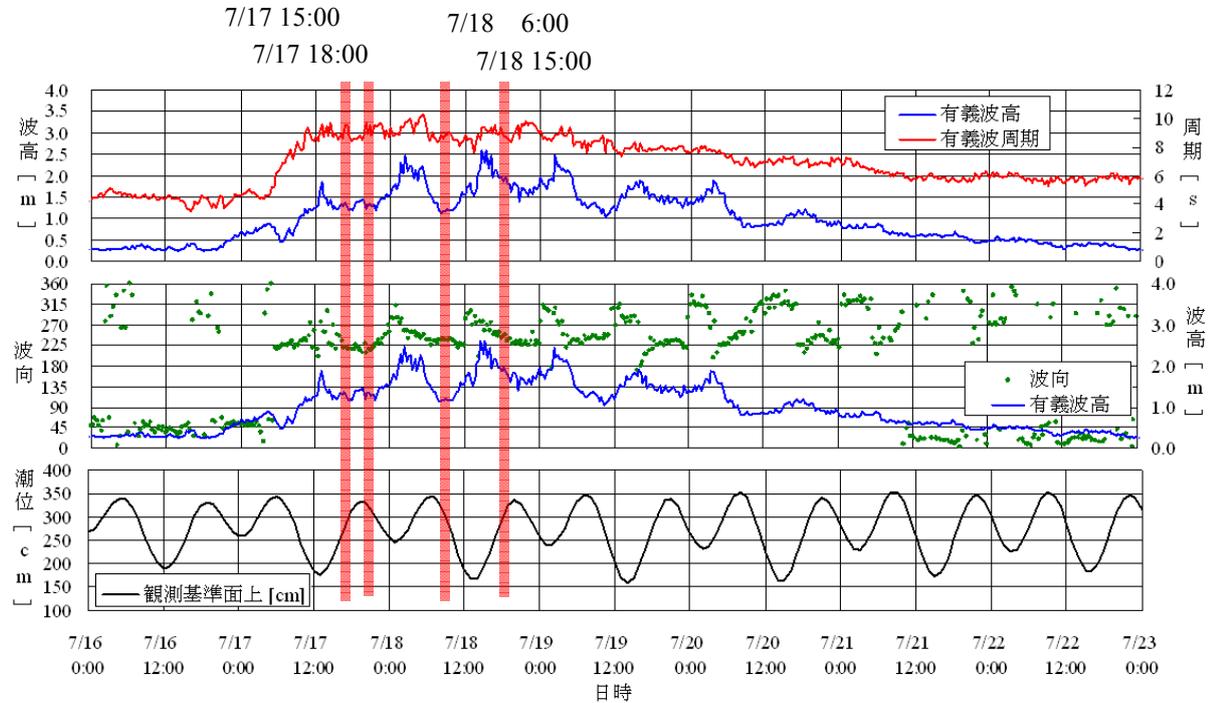
付図-B.1 精度検証のための再現計算で対象とした那覇空港周辺のリーフ地形および現地波浪観測地点

B.1 現地波浪観測の概要

まず、那覇空港に隣接する那覇港沖の NOWPHAS 波浪観測地点（付図-B.1）で得られた、対象擾乱時の波高、周期、波向、潮位の時系列変化を付図-B.2 に示す。

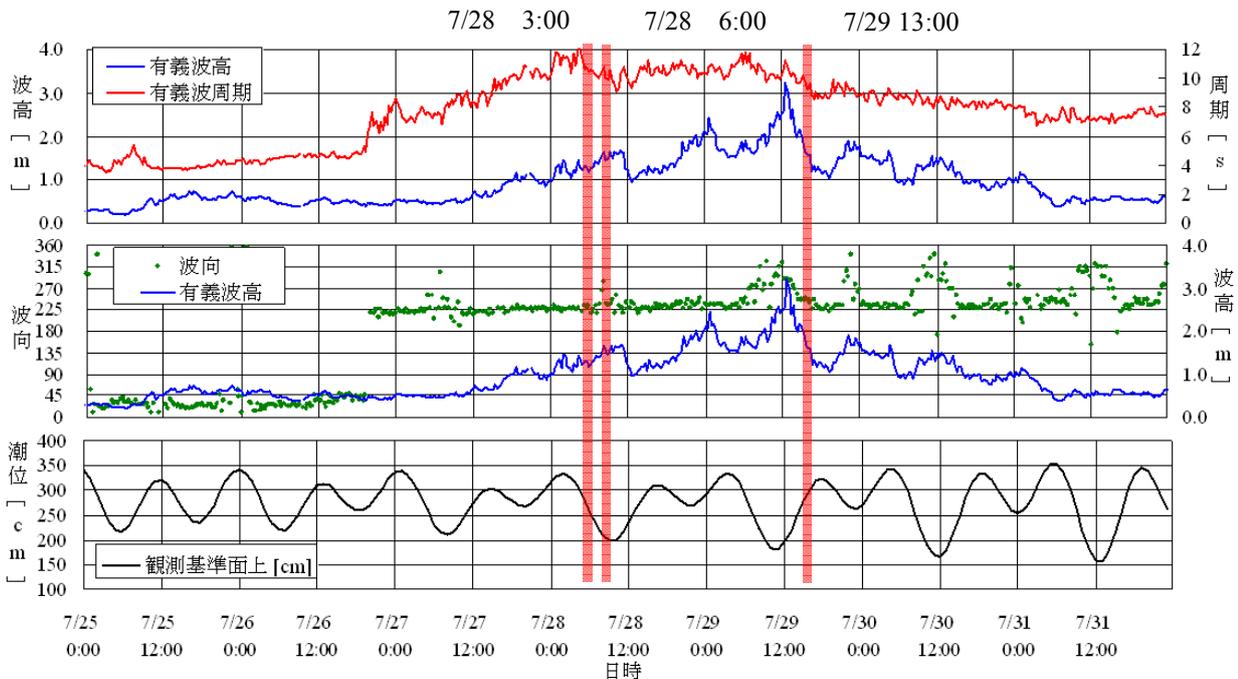
台風 7 号来襲時（図の上段）には、7/17 の朝から急に

周期が長くなり始め、その日の正午から 7/19 の 0 時過ぎに徐々に減少し始めるまで、周期 9s 程度の波が継続して来襲していたことがわかる。この間に観測された波高は 1.5 ~ 2.5m、高波高時の波向きは SW ~ W（N からの角度 225 ~ 270 度）であった。



※波向きは、Nからの角度を表す。また潮位は、観測基準面上の高さを表す。

(a) 台風 7 号来襲時（2008 年 7 月 16 日 ~ 22 日）



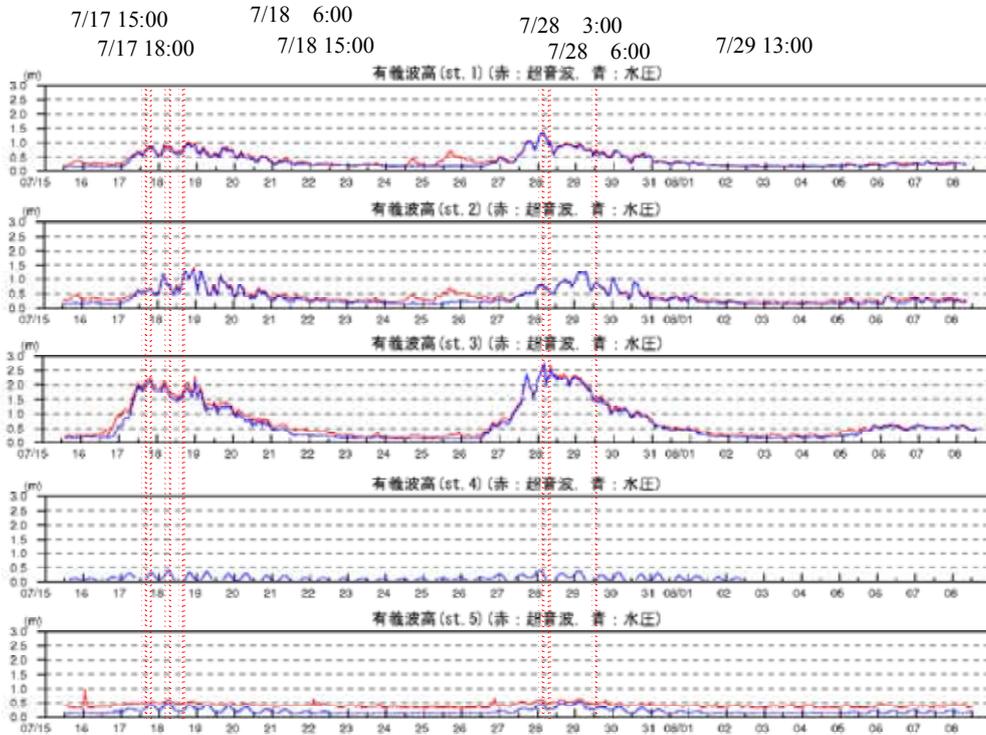
※波向きは、Nからの角度を表す。また潮位は、観測基準面上の高さを表す。

(b) 台風 8 号来襲時（2008 年 7 月 25 日 ~ 31 日）

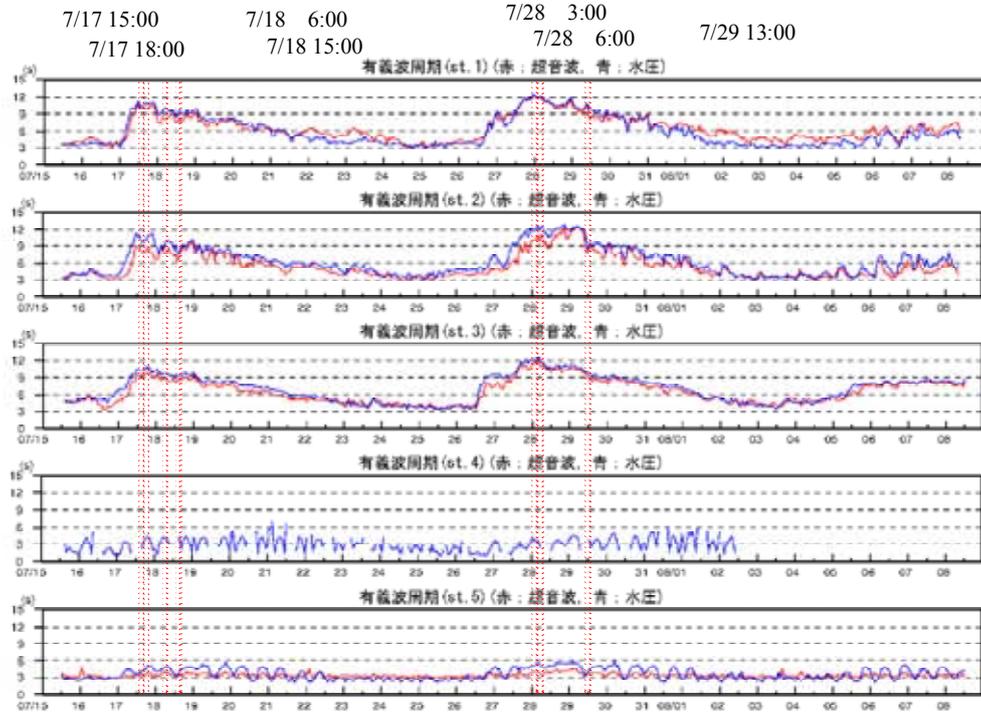
付図-C.2 現地波浪観測期間に那覇港 NOWPHAS 波浪観測地点で得られた波高、周期、波向、潮位の時系列変化

付表-B.1 那覇空港リーフ地形周辺の各波浪観測地点の地盤高（設置水深）

	St.1	St.2	St.3	St.4	St.5
設置水深（D.L.基準）	D.L.-28.2m	D.L.-20.3m	D.L.-28.5m	D.L.+0.4m	D.L.-4.4m



(a) 有義波高



(b) 有義波周期

付図-B.3 波浪観測地点 St.1～St.5 で観測された波浪諸元の時系列変化（夏季：2008/7/15～8/6）

一方、台風 8 号来襲時(図の下段)には、7/26 の夜から徐々に周期が長くなり始め、7/28 未明には 12s 程度の波が来襲し、その後も 7/29 正午過ぎまで、周期 11s 程度の波が継続して来襲していたことがわかる。この間に観測された波高は 1.5~3.0m、波向きはほぼ SW(N からの角度 225 度)で一定であった。

また、この海域における潮位変動は、 O_1 、 K_1 分潮(1 日周期)と S_2 、 M_2 分潮(半日周期)の主要 4 分潮が卓越していることがわかる。なお、これらの観測基準面は、次式により D.L.基準に変換できる。

$$\text{潮位(D.L.基準)} = \text{潮位(観測基準面)} - 1.346(\text{m}) \quad (\text{B.1})$$

このように時系列的に得られた観測データのなかから、ブシネスクモデルによる再現計算を行う代表 7 時刻を抽出し、図にラインを引いて示した。これらは、いずれも比較的大きな波高が観測された時刻のうち、それぞれ満潮時、干潮時、上げ潮時、下げ潮時のいずれかを代表するものである。これは、水深が非常に浅いリーフ上の波・流れ場では、潮位や潮汐流による影響が無視できないことに配慮したためである。

ここで、波浪観測地点 St.1~St.5 における設置水深を D.L.基準で付表-B.1 に示す。これと付図-B.2 に示す潮位記録、および式(B.1)より、特にリーフ上の St.4 では、観測基準面上の潮位が 1.746m を下回る時刻(7/19 14 時、7/30 12 時、等)では、観測機器を設置した地盤自体が干出していたことがわかる。また、上記で抽出した代表 7 時刻のうち最も潮位の低かった 7/18 15 時(潮位: D.L.+0.45m)における数字上の水深は、僅か 5cm 程度であったが、実際にはこれにウェーブセットアップによる水位上昇が加算された水深となっていたと思われる。しかしながら、実海域においては絶えず波が存在し、静水位を正しく設定することができないため、現地観測結果からこの時刻の波による平均水位上昇量を正確に知るとは非常に困難である。

なお、海底地盤が露出しているときは当然であるが、このように水深が非常に浅い場合には、波高計による水位観測ができず、すべて欠測となっている。代表 7 時刻に関しては、7/17 15 時、7/18 15 時、7/28 06 時、7/29 13 時、の各時刻において、水圧式波高計でのみ観測を行った St.4 の水位変動データが欠測、または著しく信頼性の低いデータしか得られなかった。

一方、St.4 を除くその他の観測地点では、超音波式波高計と水圧式波高計の両方で水位変動を観測したが、観測データとしては、より直接的に水位を捉えている超音

波式波高計による観測データを採用した。

これらの観測データは、サンプリングタイム 0.5s で 1 時間毎のデータセットとして保存されており、1 データセットあたりのデータ個数は 7200 個である。したがって、FFT 法によるスペクトル解析には、この前半の 4096 個(約 34 分間)のデータを用いた。また本研究では、ゼロアップクロス法による統計解析についても、これと同じデータ個数を用いて実施した。

なお、これらの期間に波浪観測地点 St.1~St.5 で得られた有義波高および有義波周期の時系列波形を、付図-B.3 に示す。ここで、赤線は超音波式、青線は水圧式波高計による観測結果である。高波浪時に大きな波高が観測されるリーフ周辺の St.1~St.3 では、両波高計で観測される有義波高値はほぼ同等とみなされるが、水圧式波高計は、超音波式に比べ、有義波周期を長めに見積もる傾向がある。すなわち、短周期波成分に対する応答性が劣っていることが確認できる。また、リーフ内に設置され、静穏時や、高波浪時でも波高が十分に減衰する St.5 では、水圧式波高計による観測波高は、超音波式に比べ、かなり過小評価する傾向がある。すなわち、水面の微小な変動に対する応答性が劣っていることが確認できる。さらに、非常に水深が浅いリーフ上に設置され、満潮時から平均潮位時にかけての水位変動に関して、水圧式波高計のみによる観測が実施された St.4 でも、同様に、上記のような観測誤差が含まれることが想定される。

B.2 ブシネスクモデルによる再現計算結果

(1) 計算条件

現地観測結果より、再現対象とした代表 7 時刻の波向きはほぼすべて SW とみなせる。したがって、那覇空港周辺リーフに入射する波は、まず、その沖側に位置する St.3 で観測されると考えられる。そこで、ここで行う再現計算において、入射境界に与える方向スペクトルは、St.3 で観測された波浪諸元を再現するようにして決定した。これらの入射波条件を付表-B.2 に示す。

また、対象時刻における再現計算時間は、現地観測結果の解析に約 34 分間のデータを用いていること、および不規則波の波群特性による影響を抑えるために、代表周期の 200 波分程度を対象とすることを考慮して、約 30~40 分間造波することとした。ただし、リーフに波が到達し、安定した波浪場が得られるまでに必要な前駆時間として、さらに 250 波~300 波分の造波を行った。なお、これらの再現計算では、現地波浪観測地点に対応する計算格子で水位変動の時系列データを出力し、同様にスペクトル解析および統計解析を行った。ただし、このとき

付表-B.2 再現計算に用いた各代表時刻の入射条件

対象時刻	NOWT-PARI 入射波スペクトル条件				潮位 (那覇)	気象 要因
	波向	H _{1/3}	T _{1/3}	Smax		
2008年7月17日 15:00	216 SW	1.83	8.9	73	0.69	台風 7号
2008年7月17日 18:00	212 SSW	2.12	9.6	71	1.71	"
2008年7月18日 6:00	214 SW	1.94	8.6	70	2.00	"
2008年7月18日 15:00	226 SW	1.57	8.6	73	0.45	"
2008年7月28日 3:00	211 SSW	2.47	11.2	67	1.85	台風 8号
2008年7月28日 6:00	211 SSW	2.18	10.5	68	1.15	"
2008年7月29日 13:00	218 SW	1.50	8.6	72	0.77	"

H_{1/3}, T_{1/3}は有義波高、有義波周期を表す。波高、周期の単位はそれぞれ、[m]、波向の数値の単位は[deg.]で、Nからの角度を表す。
Smaxは方向集中度の最大値を表す。
潮位の基準は、D.L.である。

付表-B.3 再現計算に対して設定した計算条件

検証時刻	代表周期 T _{1/3} [s]	タイムステップ DT [s]	緩造波時間 TTIN [s]	テータサンプリング 間隔 TDEL [s]	テータサンプリング 開始時刻 TSVE [s]	計算終了時刻 TEND [s]
2008.07.17 15:00	8.9	0.020	450.0	0.225	2250.0	4095.0
2008.07.17 18:00	9.6	0.020	450.0	0.225	2250.0	4095.0
2008.07.18 6:00	8.6	0.020	450.0	0.225	2250.0	4095.0
2008.07.18 15:00	8.6	0.020	450.0	0.225	2250.0	4095.0
2008.07.28 3:00	11.2	0.030	600.0	0.300	3000.0	5460.0
2008.07.28 6:00	10.5	0.030	600.0	0.300	3000.0	5460.0
2008.07.29 13:00	8.6	0.020	450.0	0.225	2250.0	4095.0

のサンプリングタイムは 0.225 ~ 0.300s とし、8192 個のデータを使用することにより解析精度の向上を図っている。これらの計算条件を付表-B.3 に示す。

さらに、付図-B.1 に示す計算領域を分割する等方格子の1辺の長さは、計算容量および計算精度を勘案し、5m とした。ブシネスクモデルを用いた波浪変形計算においては、波形の伝播・変形過程をそのまま計算するため、それを近似する計算格子は、計算対象とする波の波長の1/8 ~ 1/10 程度に細かく設定する必要がある。なお、今回の場合、最も波長が短くなるリーフ上（水深 5m 程度）で波長 40m 程度となる周期は 6s 程度であるため、その成分波まで考慮しても、少なくとも周期 5s 未満の波の伝

播・変形過程を再現することはできない（差分誤差により、波高が著しく減衰することが予想される）。

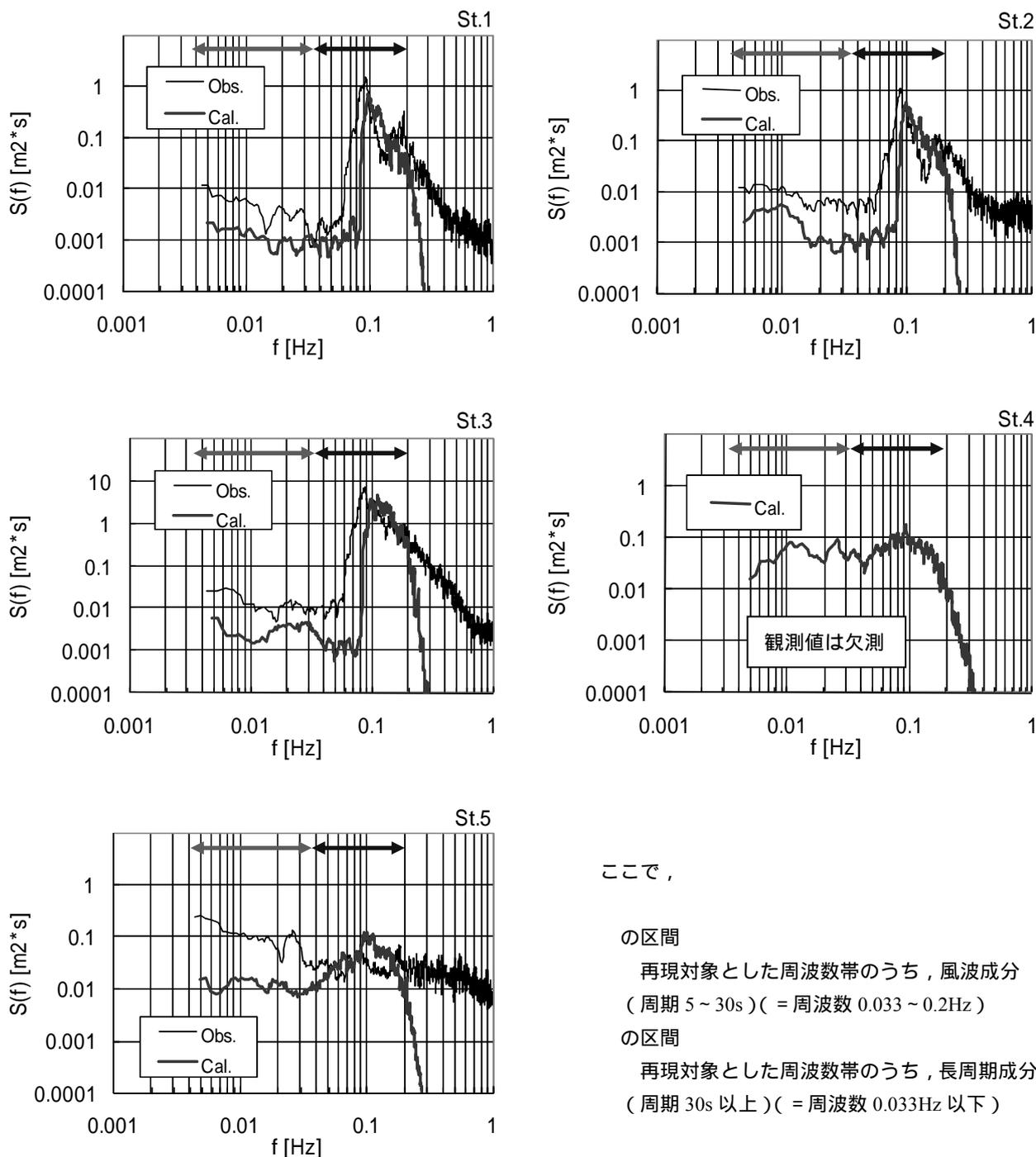
一方、リーフ上海域では、その非常に複雑な海底地形のために、他の海域に比べ、海底面による波エネルギー損失が大きいことも想定される。しかしながら、本再現計算においては、リーフ周辺およびリーフ上での碎波による乱れの逸散過程を考慮した碎波モデル、および海底面の露出等も許容する遡上モデルを用いていることから、試行錯誤の結果、他の海域等で従来から用いられている底面摩擦係数 $f=0.02$ を、リーフ上においてもそのまま適用することとした。

(2) 周波数スペクトルの再現性

現地観測および再現計算によって St.1~St.5 で得られた、各代表時刻の周波数スペクトルを、図-B.4 に示す。それぞれ、図中の細線は観測結果、太線は計算結果である。

ここで、図中に示した区間 および区間 は、それぞ

れ再現計算における精度検証の対象とした波エネルギーが含まれる周波数範囲を示す。すなわち、区間 に含まれる波エネルギーは、本編において、越波流量算定図より護岸越波量を推定する際に用いる護岸前面波高に対応するものであり、区間 に含まれる波エネルギーは、同様に、護岸前面水深を算定する際に考慮すべきとしたサ



ここで、

- の区間
再現対象とした周波数帯のうち、風波成分
(周期 5 ~ 30s) (= 周波数 0.033 ~ 0.2Hz)
- の区間
再現対象とした周波数帯のうち、長周期成分
(周期 30s 以上) (= 周波数 0.033Hz 以下)

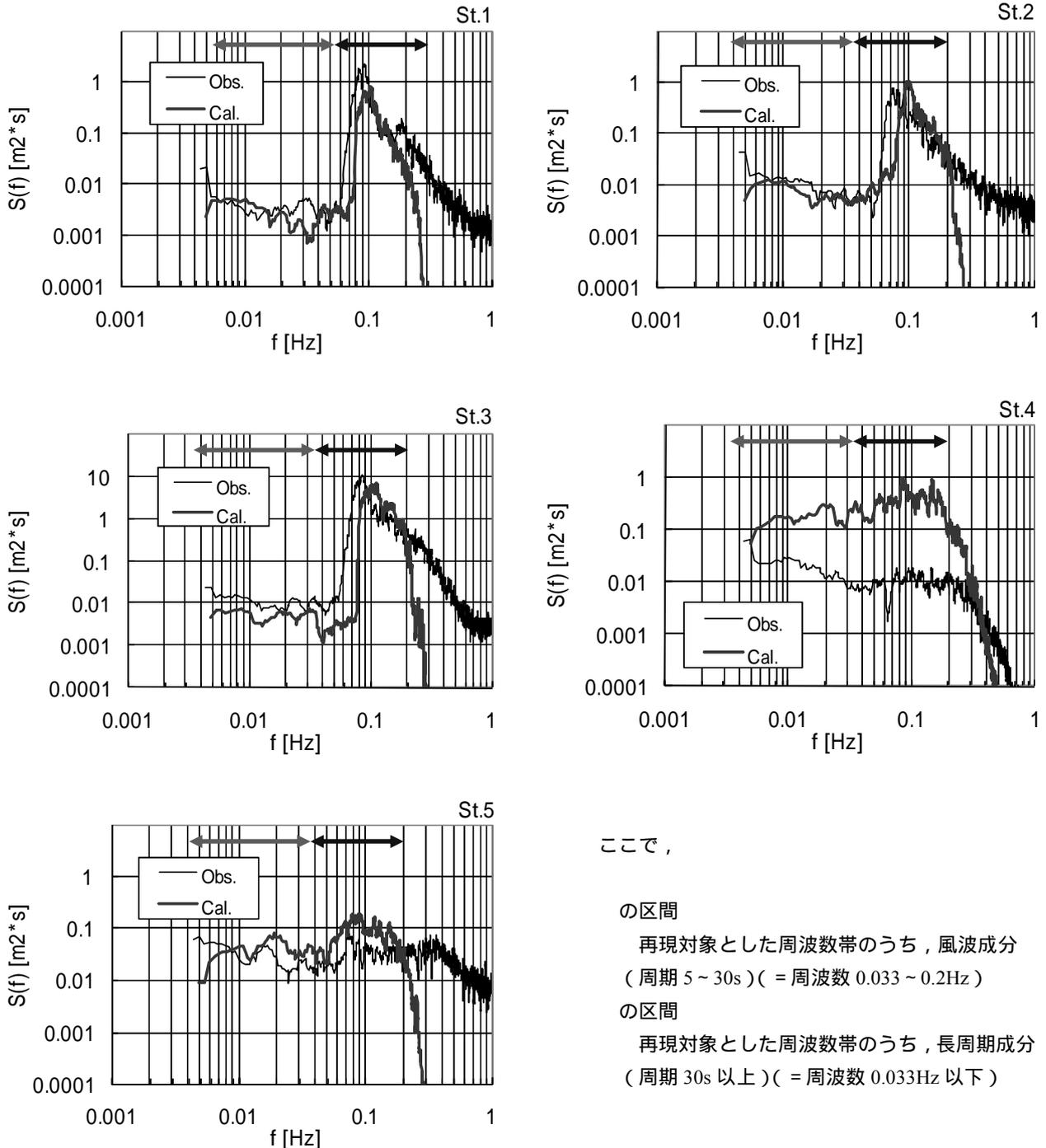
付図-B.4(a) 那覇空港周辺リーフで観測された周波数スペクトルに対する再現計算結果 (2008/07/17 15:00)

ーフビート波高に対応するものである。

一方、これらの区間よりも高周波側(0.2Hz以上 (=5s以下))の波エネルギーに対しては、今回設定した計算条件では差分誤差が著しく大きくなるのが想定されたため、再現計算の適用範囲外とした。

なお、これらの結果は、水深が非常に浅いリーフ上お

よびその周辺海域で得られたものであるため、潮位条件によって波浪特性が異なると考えられる。したがって、以下で行う考察では、それぞれの時刻の潮位条件(干潮時、満潮時、および平均潮位時)で場合分けしたうえで行うこととした。



ここで、

の区間

再現対象とした周波数帯のうち、風波成分
(周期 5 ~ 30s) (= 周波数 0.033 ~ 0.2Hz)

の区間

再現対象とした周波数帯のうち、長周期成分
(周期 30s 以上) (= 周波数 0.033Hz 以下)

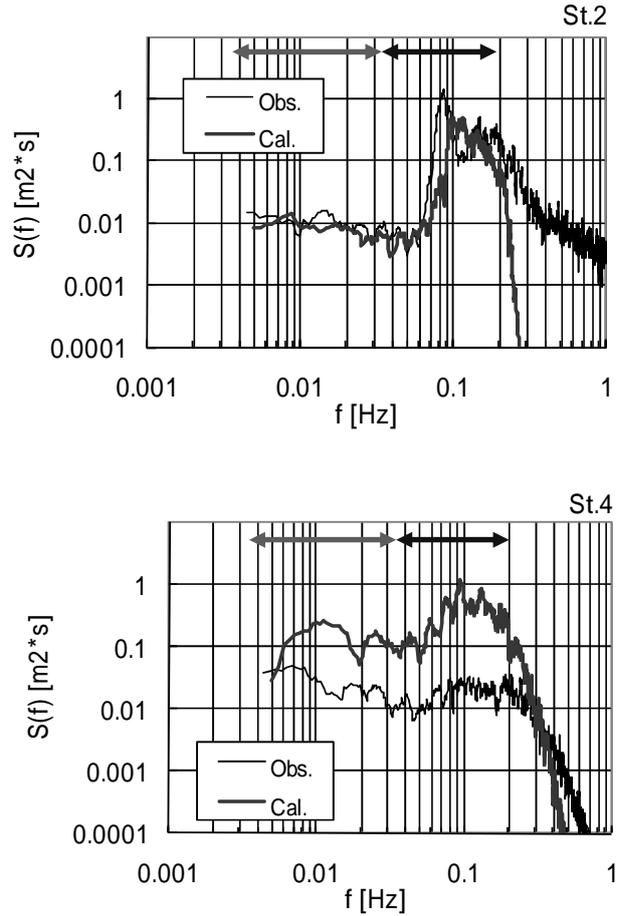
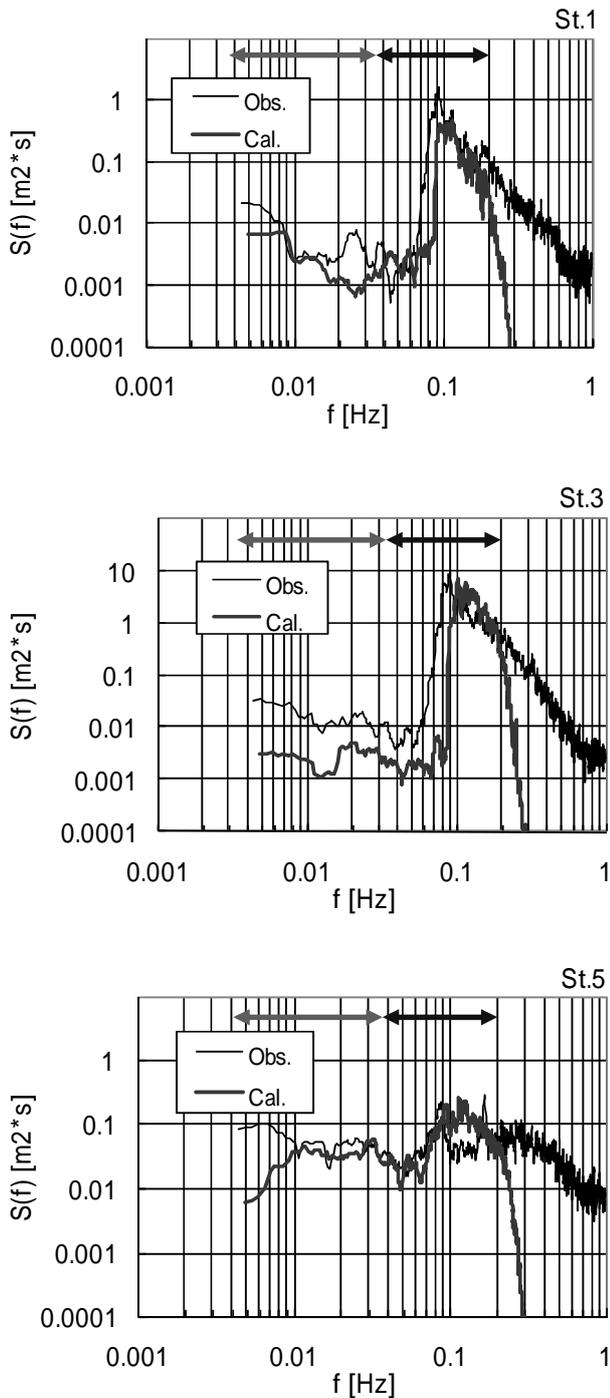
付図-B.4(b) 那覇空港周辺リーフで観測された周波数スペクトルに対する再現計算結果 (2008/07/17 18:00)

(a) 干潮時(上げ潮時を含む)

干潮時(17日 15時, 18日 15時, 29日 13時)には、少し盛り上がったリーフエッジやリーフ上の浅場では海底面が露出し、さらに上げ潮時へと移行する過程では、リーフ上への波の遡上が盛んに生じている状況が想定される。また、リーフの切れ目周辺では岸向きの潮

流が発生しているものと考えられるが、少なくとも上げ潮へと移行した直後ではそれほど速くないと思われる。

このような海象条件において観測されたリーフ上およびその周辺の観測スペクトルと、それらの再現計算によって得られた計算スペクトルを比較した結果を、それぞれ付図-B.4(a), (d)および(g)に示す。



ここで、

の区間

再現対象とした周波数帯のうち、風波成分
(周期 5 ~ 30s) (= 周波数 0.033 ~ 0.2Hz)

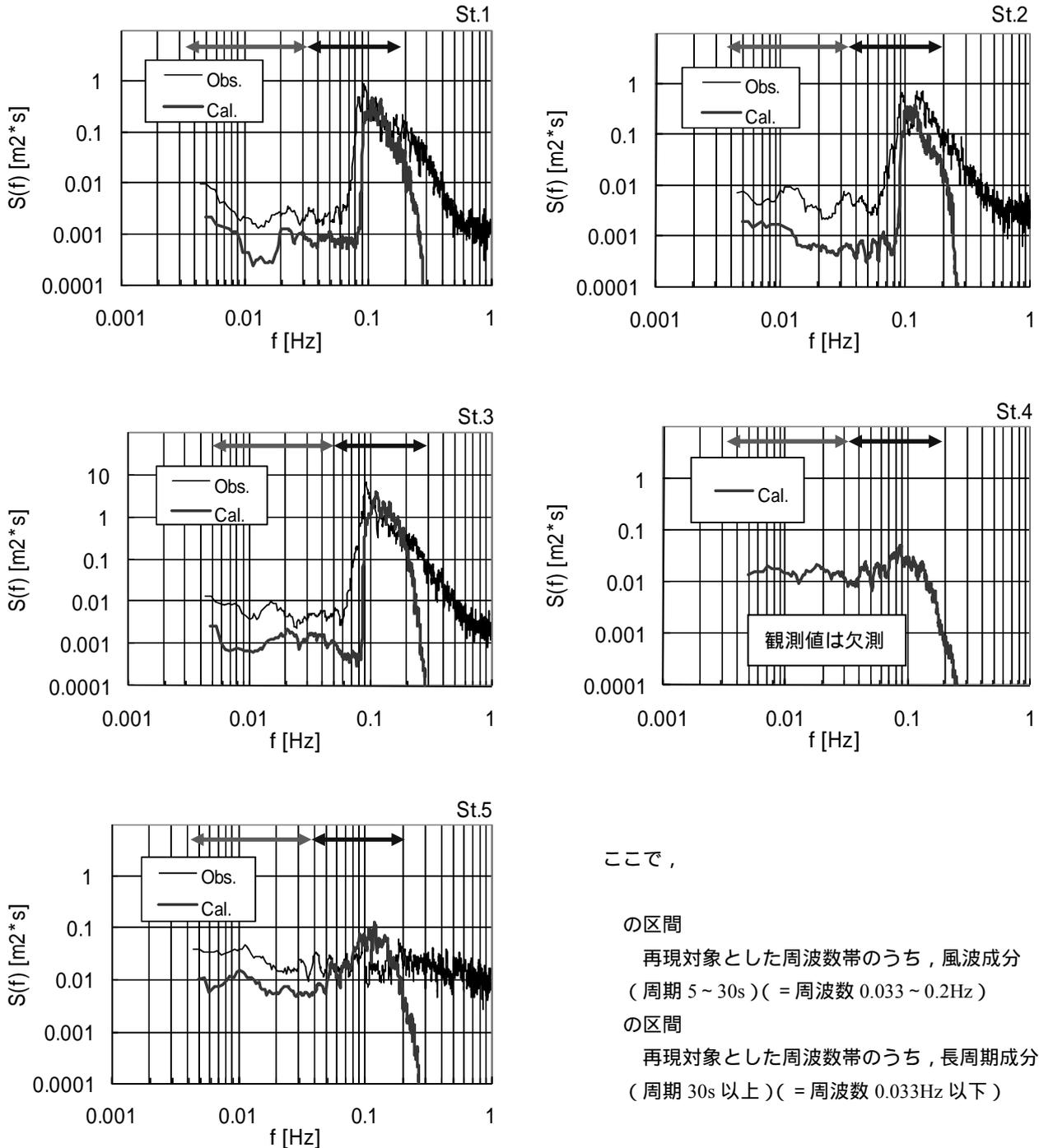
の区間

再現対象とした周波数帯のうち、長周期成分
(周期 30s 以上) (= 周波数 0.033Hz 以下)

付図-B.4(c) 那覇空港周辺リーフで観測された周波数スペクトルに対する再現計算結果 (2008/07/18 06:00)

まず、入射波に対して最も沖側に位置し、入射スペクトルの合わせ込み対象とした St.3 では、当然ながら、いずれの時刻においても、ピーク付近の波エネルギーは比較的良好に再現されている。一方、0.08Hz 以下 (12.5s 以上) のうねり・長周期波成分では、再現計算で得られた計算スペクトルは、観測されたこの周波数帯の波エネルギーよりも 1 オーダー程度小さいことがわかる。

しかしながら、再現計算では、そもそもこの周波数帯の波エネルギーを造波していないので、逆に、実際のリーフ海域で生じるラディエーション応力の変化や波の非線形干渉等を考慮し、St.3 地点で観測される長周期成分 (サーフビート等) をこの程度まで再現できたと捉える



ここで、

の区間

再現対象とした周波数帯のうち、風波成分 (周期 5 ~ 30s) (= 周波数 0.033 ~ 0.2Hz)

の区間

再現対象とした周波数帯のうち、長周期成分 (周期 30s 以上) (= 周波数 0.033Hz 以下)

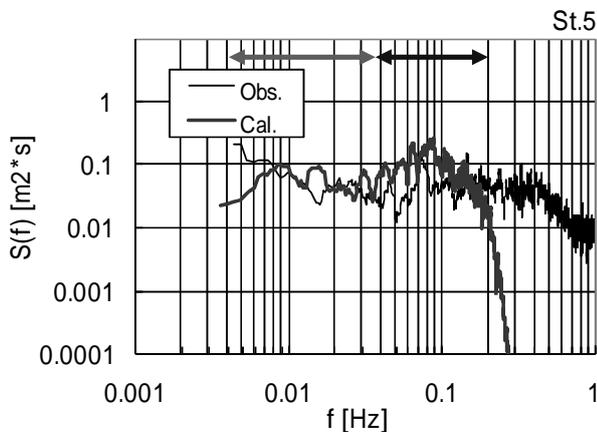
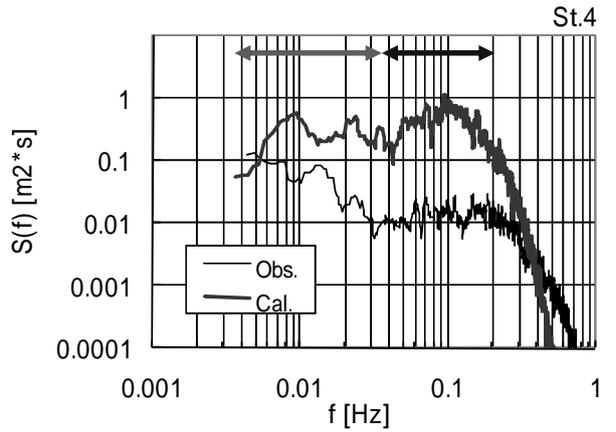
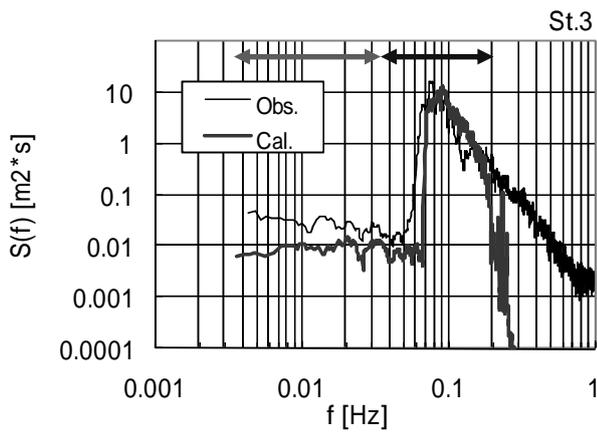
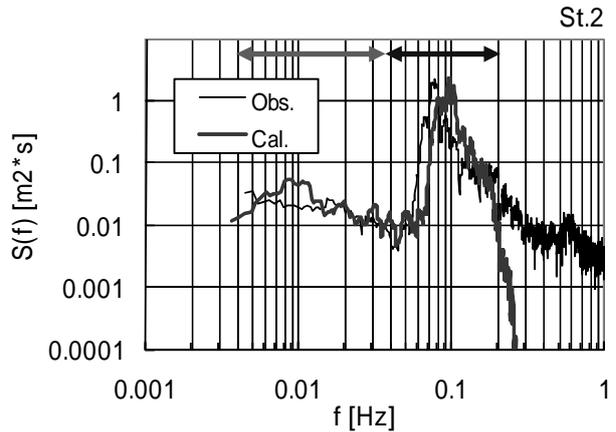
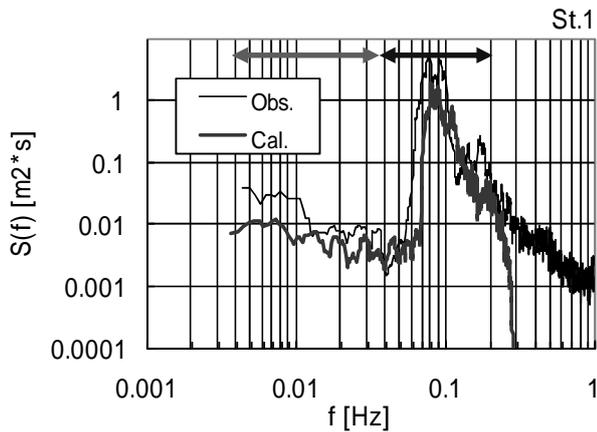
付図-B.4(d) 那覇空港周辺リーフで観測された周波数スペクトルに対する再現計算結果 (2008/07/18 15:00)

ほうが妥当と考えられる。また、観測スペクトルには、計算領域外で発生した長周期波成分の波エネルギーも同時に含まれているであろうことが推測される。

さらに、これより波下側のリーフ外縁に位置する St.1、St.2 では、ピーク付近の波エネルギーは比較的良好一致し、特に St.1 では、0.08Hz 以下のうねり・長周期成分の

波エネルギーも、観測スペクトルにより近い結果として計算されている。これは、この海域では隣接するリーフ周辺で発生した長周期波成分の影響がより顕著となり、このようなラディエーション応力の変化や非線形干渉等をうまく再現できたためではないかと推測される。

一方、リーフ上に位置する St.4 では観測に十分な水位



ここで、

の区間

再現対象とした周波数帯のうち、風波成分
(周期 5 ~ 30s) (= 周波数 0.033 ~ 0.2Hz)

の区間

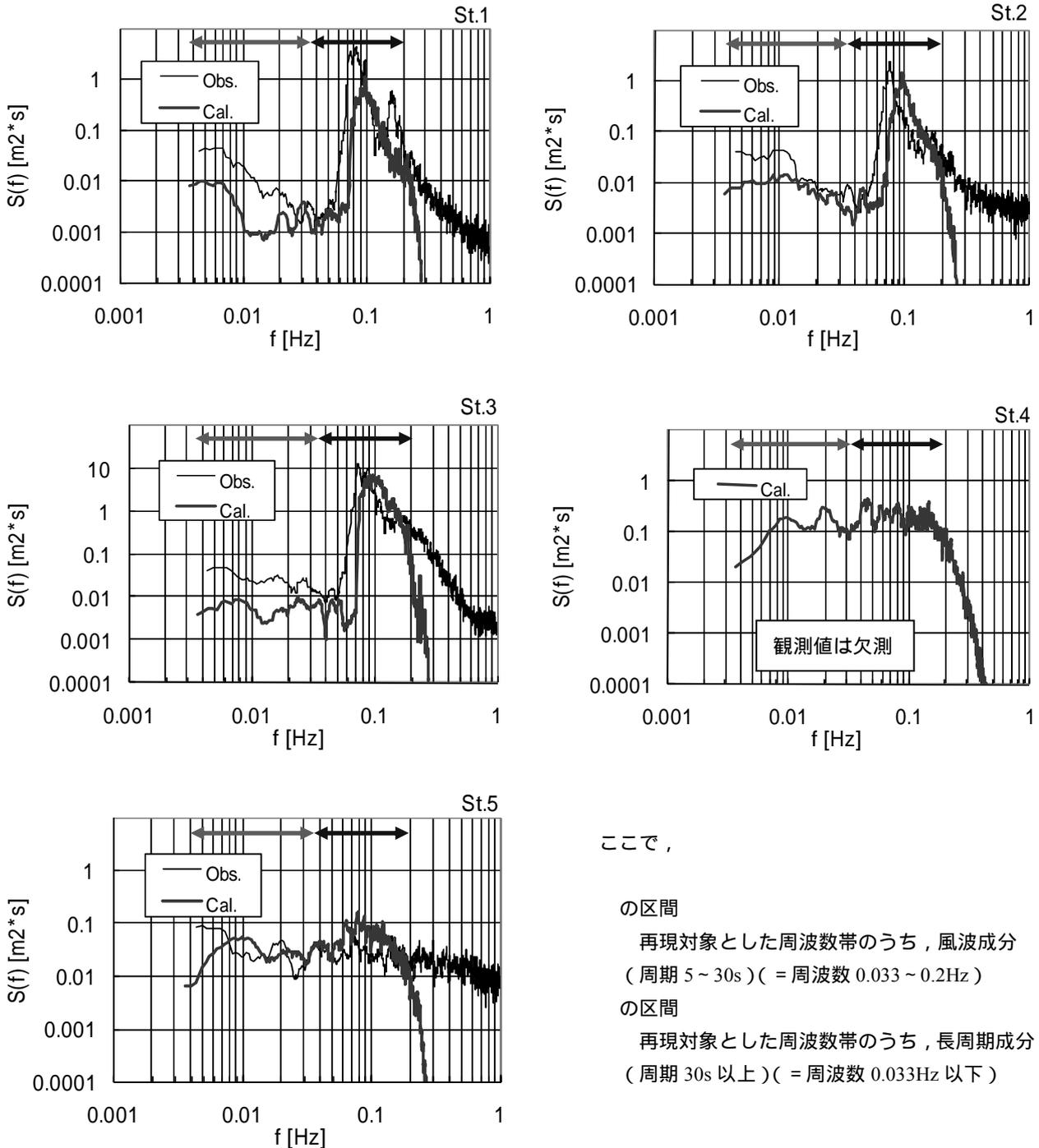
再現対象とした周波数帯のうち、長周期成分
(周期 30s 以上) (= 周波数 0.033Hz 以下)

付図-B.4(e) 那覇空港周辺リーフで観測された周波数スペクトルに対する再現計算結果 (2008/07/28 03:00)

が確保されず欠測であった。しかし、リーフの切れ目に近く、ある程度の水深が確保されたリーフ内の St.5 で得られた計算結果は、観測結果に対し、周波数 0.08 ~ 0.2Hz (周期 5 ~ 12.5s) の短周期波成分では若干高め、周波数 0.08 以下 (周期 12.5s 以上) では若干低めであったが、リーフ内の波高減衰と波の非線形干渉等による周波数ス

ベクトルの平滑化を、St.4 地点を含め、概ねよく再現できていることを確認した。

これらのことから、まず干潮時において、ブシネスクモデルによる波浪変形計算は、リーフ上およびその周辺海域における短周期波の波高減衰とサーフビートの発生・発達を比較的良好に再現できていると考えられる。



ここで、

の区間

再現対象とした周波数帯のうち、風波成分
(周期 5 ~ 30s) (= 周波数 0.033 ~ 0.2Hz)

の区間

再現対象とした周波数帯のうち、長周期成分
(周期 30s 以上) (= 周波数 0.033Hz 以下)

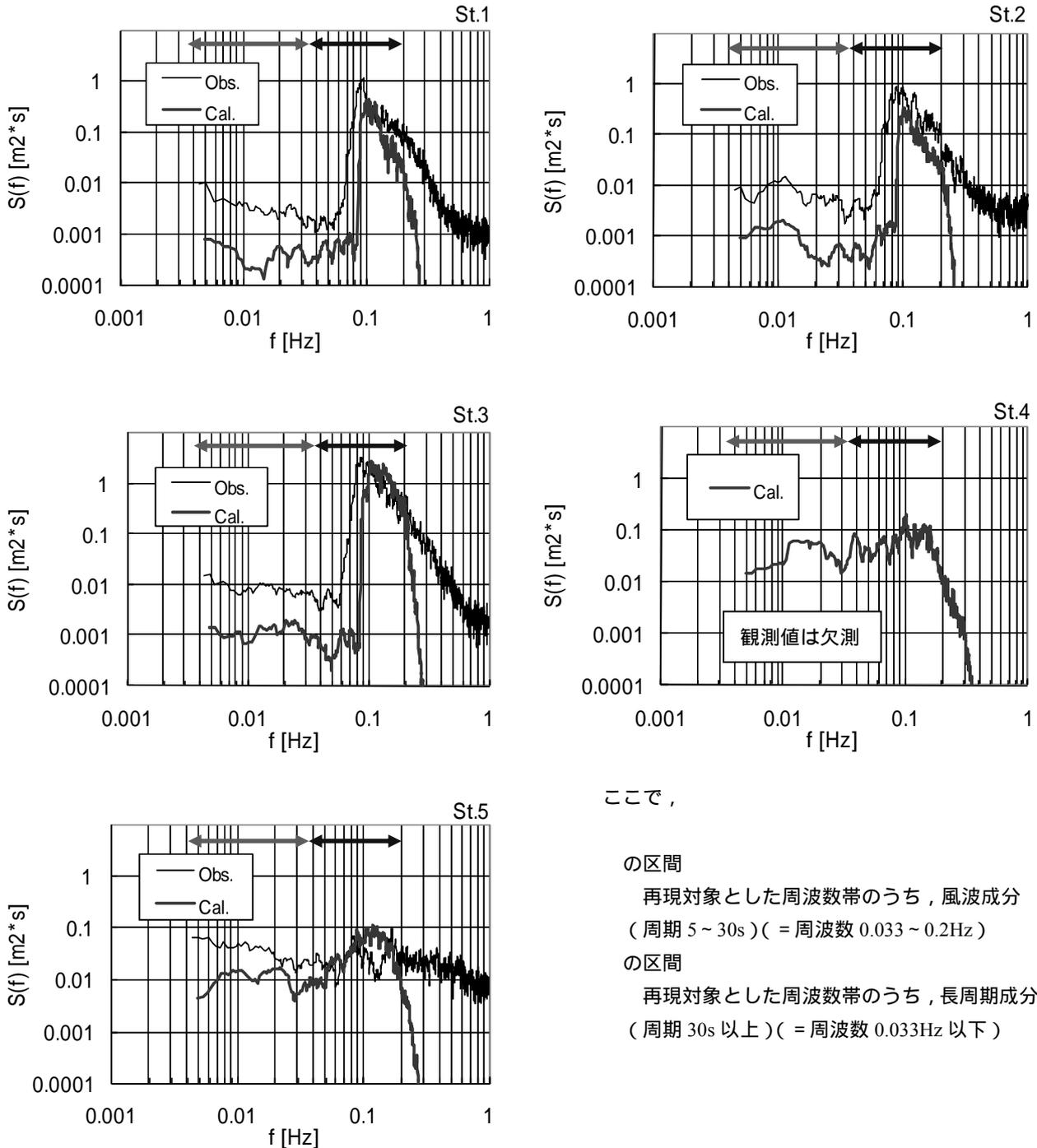
付図-B.4(f) 那覇空港周辺リーフで観測された周波数スペクトルに対する再現計算結果 (2008/07/28 06:00)

(b) 満潮時(上げ潮時, 下げ潮時を含む)

満潮時(17日 18時, 18日 06時, 28日 03時)には, ほぼすべてのリーフが水没し, さらに下げ潮時へと移行する過程では, 波で押し上げられていたリーフ上の水塊が, 潮流とともにリーフの切れ目周辺を中心として沖へ流出し始める状況が想定される. 一方, 上げ潮時

から満潮へ移行する過程では, 岸向きの潮流を含めて流れ場はほぼ安定し, 満潮時とほぼ同様な状況が想定される.

このような海象条件において観測されたリーフ上およびその周辺の観測スペクトルと, それらの再現計算によって得られた計算スペクトルを比較した結果を, それぞ



ここで,

の区間

再現対象とした周波数帯のうち, 風波成分
(周期 5 ~ 30s) (= 周波数 0.033 ~ 0.2Hz)

の区間

再現対象とした周波数帯のうち, 長周期成分
(周期 30s 以上) (= 周波数 0.033Hz 以下)

付図-B.4(g) 那覇空港周辺リーフで観測された周波数スペクトルに対する再現計算結果 (2008/07/29 13:00)

れ付図-B.4(b), (c)および(e)に示す。

まず、干潮時と同様に、入射波に対して最も沖側に位置し、入射スペクトルの合わせ込み対象とした St.3 では、当然ながら、いずれの時刻においても、ピーク付近の波エネルギーは非常によく再現されている。一方、再現計算で得られた 0.08Hz 以下 (12.5s 以上) のうねり・長周期波成分では、波エネルギーは未だ若干小さいものの、干潮時に比べ、観測スペクトルを比較的良好に再現していることがわかる。干潮時と同様に、入射境界ではこの周波数帯の波エネルギーを造波していないので、これは、観測スペクトルに含まれる計算領域外で発生した長周期成分の波エネルギーが相対的に減少し、代わりに、計算領域内の実際のリーフ海域で生じ St.3 で観測された長周期成分を、計算で再現できたためであろうと考えられる。

さらに、これより波下側のリーフ外縁に位置する St.2 では、ピーク付近の波エネルギーは同様によく一致するとともに、0.08Hz 以下のうねり・長周期成分の波エネルギーも、観測スペクトルを非常によく再現している。これは、特に満潮時には、計算領域外で発生した長周期成分の影響はほとんど受けず、隣接するリーフ周辺でのラディエーション応力の変化や波の非線形干渉等により発生した長周期波成分を、計算でよく再現できたためであろうと推測される。なお、St.1 に関して、特にピーク付近で計算された波エネルギーが、観測スペクトルに対して若干小さめに算定されている原因については、後述する平均潮位時の考察において触れることとする。

一方、リーフ上に位置する St.4 では、観測された波エネルギーに対して、計算結果は 1 オーダー以上大きな値となっている。しかしながら、すでに付図-B.3 でみたように、St.4 における水位変動データは水圧式波高計でのみ取得されており、これによる観測波高は、特に短周期変動成分においてかなり劣化していると考えられるため、この比較による計算精度の検証は困難である。そこで、リーフ切れ目に近く、ある程度の水深が確保されたリーフ内の St.5 において、両者のスペクトルを比較すると、周波数 0.08 ~ 0.2Hz (周期 5 ~ 12.5s) の短周期波成分で計算スペクトルが若干高めではあるが、周波数 0.08 以下 (周期 12.5s 以上) の長周期成分を含め、両者は比較的良好に一致している。したがって、計算結果は、干潮時と同様に、リーフ内の波高減衰と波の非線形干渉等による周波数スペクトルの平滑化を、St.4 地点を含め、概ねよく再現できていることを確認した。

これらのことから、満潮時においても、ブシネスクモデルによる波浪変形計算は、リーフ上およびその周辺海域における短周期波の波高減衰とサーフピートの発生・

発達を比較的良好に再現できていると考えられる。

(c) 平均潮位時 (下げ潮時)

平均潮位時のうち下げ潮時 (28 日 06 時) には、満潮時にリーフ上に溜まっていた水塊が一斉に流出し、特にリーフの切れ目等では速い冲向き流れが生じている状況が想定される。

このような海象条件において観測されたリーフ上およびその周辺の観測スペクトルと、それらの再現計算によって得られた計算スペクトルを比較した結果を、それぞれ付図-B.4(f)に示す。

干潮時や満潮時と同様に、まず、入射波に対して最も沖側に位置し、入射スペクトルの合わせ込み対象とした St.3 では、当然ながら、いずれの時刻においても、ピーク付近の波エネルギーは非常によく再現されている。一方、再現計算で得られた 0.08Hz 以下 (12.5s 以上) のうねり・長周期波成分では、干・満潮時にみた観測スペクトルの再現性の程度からすると、それらのほぼ中間的な再現性を有することがわかる。

さらに、これより波下側のリーフ外縁に位置する St.1, St.2 では、0.08Hz 以下のうねり・長周期成分の波エネルギーに関して、やはり干・満潮時にみた観測スペクトルの再現性のほぼ中間的な波エネルギーが算定されている。

しかしながら、ピーク付近の波エネルギーに関しては、干・満潮時に比べ、むしろ再現性が劣り、観測スペクトルの方が若干大きめである。また、特にリーフの切れ目が沖へ通じる付近に位置する St.1 では、この傾向が強い。この原因としては、下げ潮時に発生する冲向きの流れによる波の波高増大が影響しているものと推測される。

すなわち、ブシネスクモデルによる波浪変形計算では、波によって生じた流れと波との干渉について、波の分散関係が大きく変化しない範囲で、ある程度再現できると考えられる。しかし、波による平均水位上昇によってリーフ上に溜まった水塊が、リーフの切れ目から沖へ流れ出る際には、比較的速い流れを伴うと予想されること、および、下げ潮時などに顕著となる潮汐流は、そもそも計算では考慮されていないことから、これらの観測地点では、今回の計算では再現できないほどの、波と流れの干渉による波高増大が生じていたことが想定される。なお、このような現象は、上述の満潮時においても少なからず生じていたものと推測される。

一方、リーフ上に位置する St.4 では、干潮時と同様に、観測に十分な水深が確保されず欠測であった。しかし、リーフ切れ目に近く、ある程度の水深が確保されたリーフ内の St.5 で得られた計算結果は、観測結果に対し、周

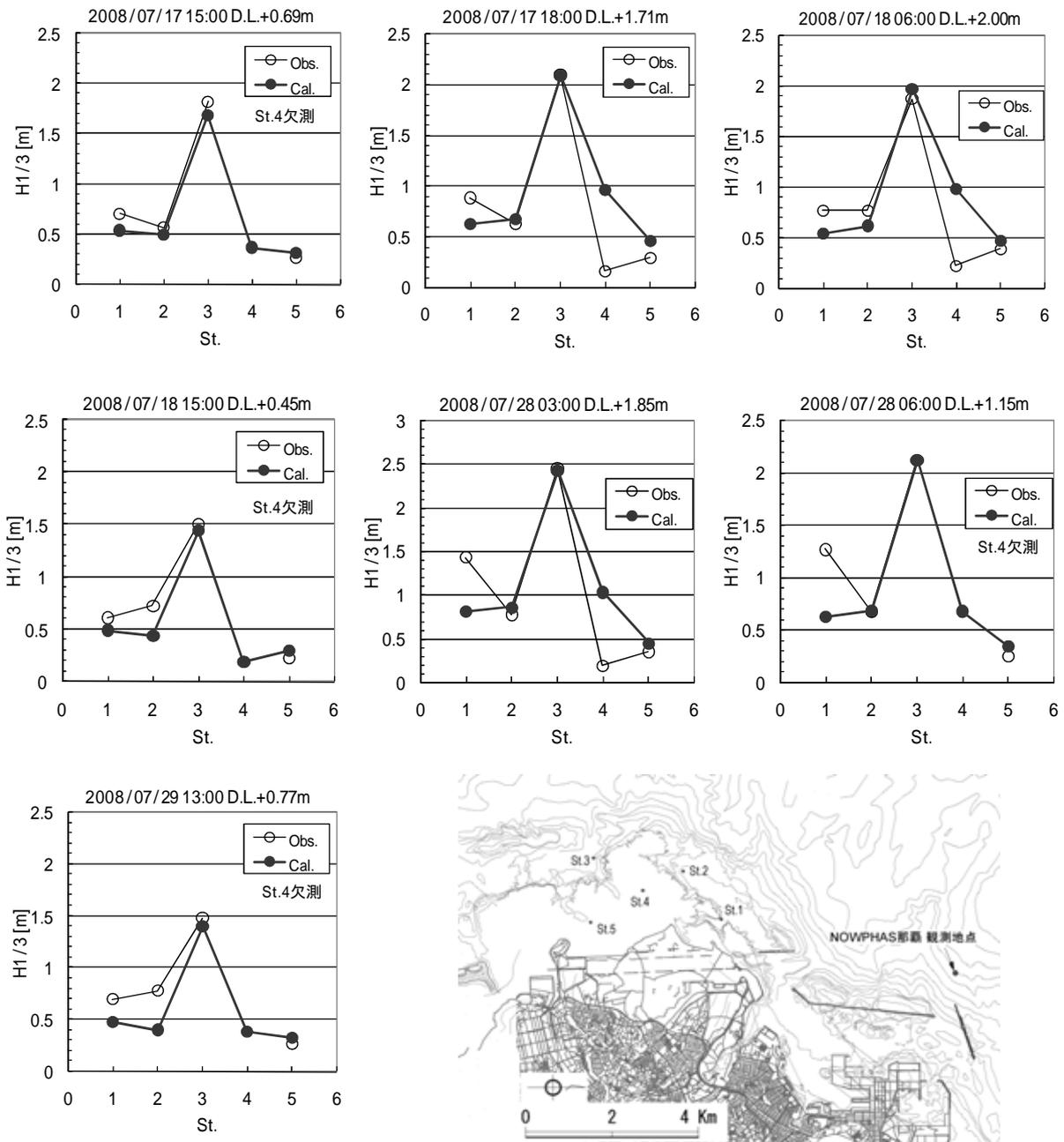
波数 0.08 ~ 0.2Hz (周期 5 ~ 12.5s) の短周期波成分では若干高め、周波数 0.08 以下 (周期 12.5s 以上) では若干低めであったが、リーフ内の波高減衰と波の非線形干渉等による周波数スペクトルの平滑化を、St.4 地点を含め、概ねよく再現できていることを確認した。

これらのことから、平均潮位時の特に下げ潮時においては、沖向きの速い流れと波との干渉が生じるリーフの切れ目周辺において、短周期波成分の波高増大の再現精度がやや劣ると考えられるものの、その他のリーフ上お

よびその周辺海域における短周期波の波高減衰とサーフビートの発生・発達については、比較的良好に再現できていると考えられる。

(3) 短周期波高およびサーフビート波高の再現性

現地観測および再現計算によって St.1 ~ St.5 で得られた、各代表時刻の短周期波高 (周波数 0.2 ~ 0.033Hz (= 周期 5 ~ 30s)) およびサーフビート波高 (0.033Hz 以下 (= 周期 30s 以上)) を、図-B.5 および図-B.6 に示す。図中



付図-B.5 那覇空港周辺リーフで観測された短周期波高に対する再現計算結果

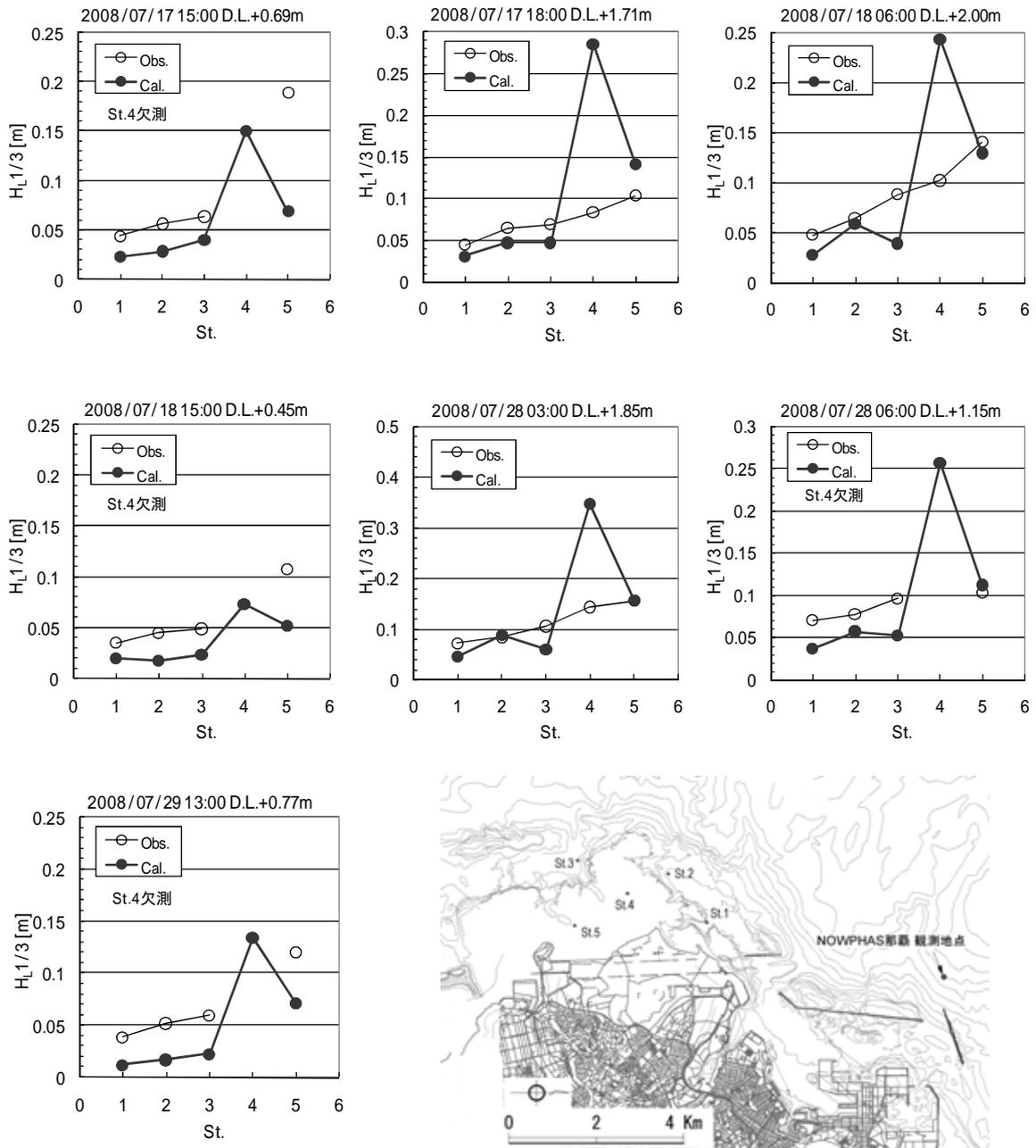
の白抜丸印および細線は観測結果，丸印および細線は計算結果である。

なお，これらは，上記の周波数スペクトルにおいて，それぞれ区間 および区間 に含まれる波エネルギーに対応するものであり，観測結果のうち，周波数 0.2Hz 以上 (=周期 5s 以下) の成分波高は除外している。したがって，以下で述べる考察は，基本的に，上述の周波数スペクトルの再現結果に対する考察とほぼ同様である。しかしながら，具体的な波高値を比較することで，より直

感的な理解が得られると思われるので，説明が重複する部分についてはご容赦いただきたい。

(a) 干潮時（上げ潮時を含む）

まず，干潮時（17日15時，18日15時，29日13時）には，短周期波高（付図-B.5左列）について，波高の合わせ込みを行った St.3 では，計算波高は観測波高に比べ若干小さめであるが，比較的良好一致している。また，リーフ外縁に位置する St.1, St.2 でも同様な傾向



付図-B.6 那覇空港周辺リーフで観測されたサーフビート波高に対する再現計算結果

が認められるが、再現性は比較的良好である。さらに、リーフ内に位置する St.4 では十分な水深が確保されず欠測であったが、リーフの切れ目に近い St.5 では、計算波高は観測波高に比べ若干大きめながら、十分な再現性を有していることがわかる。

一方、このとき計算されたサーフビート波高(付図-B.6 左列)について、最も沖側に位置する St.3、及びリーフ外縁に位置する St.1、St.2 では、計算領域内で生じるラディエーション応力の変化や波の非線形干渉等により、計算では造波されない周期 30s 以上の波高が生成されていることがわかる。このとき、観測波高では、計算領域外で発生した長周期成分も含まれていることが想定されるが、計算領域内へ進むほどこの影響は小さくなる(計算領域内で生成される長周期波成分のほうが支配的となる)ため、特に St.1 では、両者の差異が小さくなる傾向が認められる。しかし、リーフ内の St.5 では、観測で得られたサーフビート波高はリーフ周辺よりも大きくなっているのに対し、計算ではそれらが十分再現されていない。一方で、現地観測では欠測であった St.4 の計算結果では比較的大きなサーフビート波高が算定されていることから、リーフ内での多重反射による長周期成分の増幅の有無や St.5 における干潮時の観測精度も含め、この原因については今後さらに検討する必要があるものと思われる。

(b) 満潮時(上げ潮時, 下げ潮時を含む)

次に、満潮時(17日18時, 18日06時, 28日03時)には、短周期波高(付図-B.5 中央列および右列上段)について、波高の合わせ込みを行った St.3 では、計算波高と観測波高はよく一致している。また、リーフ外縁に位置する St.2 でも同様な傾向が認められる。しかし、リーフの切れ目の沖に位置する St.1 では、潮汐または波による平均水位上昇によりリーフ上に溜まった水塊が、リーフの切れ目から沖へ流出することにより、波と流れが干渉して波高増大が生じたため、この現象を十分には考慮できていない計算波高は、観測波高に対して過小評価となっている。さらに、リーフ内に位置する St.4 では、水圧式波高計による観測は行えたものの、得られた波高の信頼性には疑問が残る。そこで、リーフの切れ目に近く、十分な水深が確保された St.5 において両者を比較すると、干潮時と同様、計算波高は観測波高に比べ若干大きめであるが、十分な再現性を有していることがわかる。

一方、このとき計算されたサーフビート波高(付図-B.6 中央列および右列上段)について、最も沖側に位置する St.3、及びリーフ外縁に位置する St.1、St.2 では、干潮時

に比べ、観測波高に対する再現性が向上していることがわかる。これは、干潮時には、計算領域外で発生する長周期波成分が減少し、相対的に、計算領域内で生成される長周期波成分のほうが支配的であったと推測される。さらに、リーフ内の St.4 で算定された計算波高は観測波高に比べかなり大きいものの、観測精度の信頼性は決して高くないことに留意する必要がある。そこで、同じくリーフ内の St.5 において両者を比較したところ、観測結果において、干潮時にみられたようなサーフビート波高の顕著な増大はなく、計算波高は観測波高を比較的良好に再現している。

(c) 平均潮位時(下げ潮時)

最後に、平均潮位時(28日06時)には、短周期波高(付図-B.5 右列中段)について、波高の合わせ込みを行った St.3 では、計算波高と観測波高はよく一致している。また、リーフ外縁に位置する St.2 でも同様な傾向が認められる。しかし、リーフの切れ目の沖に位置する St.1 では、波と流れの干渉による波高増大の影響が、満潮時よりも顕著にみられ、計算波高は、観測波高に対して過小評価となっている。さらに、リーフ内に位置する St.4 では、干潮時と同様に欠測であったが、リーフの切れ目に近い St.5 では、計算波高は観測波高に比べ若干大きめながら、十分な再現性を有していることがわかる。

一方、このとき計算されたサーフビート波高(付図-B.6 右列中段)について、最も沖側に位置する St.3、及びリーフ外縁に位置する St.1、St.2 では、干・満潮時の再現性の程度のほぼ中間的なサーフビート波高を算定していることがわかる。また、現地観測では欠測であった St.4 では、計算結果では比較的大きなサーフビート波高が算定され、同じくリーフ内の St.5 で算定されたサーフビート波高は、観測波高を比較的良好に再現している。

B3. 広いリーフ上の再現計算精度に関するまとめ

本編において、リーフ上護岸の越波流量を推定する際に必要となる、護岸前面の短周期波高および護岸前面水深の水位上昇量は、ブシネスクモデルを用いた波浪変形計算により算定することを提案した。このうち、広いリーフ上で生じる波の碎波減衰、およびラディエーション応力の変化や波の非線形干渉等によって生じるサーフビート波高の算定精度について、隣接するリーフ海域における現地観測データを用いた再現計算を行い、その妥当性を検証した。これらの結果をまとめて以下に示す。

- ・ 干潮時に算定されたリーフ内波高のうち、短周期波

高の再現性は比較的良好であるが、現地リーフ地形上で観測された大きなサーフビート波高を、数値計算によって説明できるまでには至っていない。観測結果の精度も含め、この原因については今後検討する必要があると考える。しかしながら、リーフ上護岸の越波量を推定する場合には、潮位が低いため、この条件がクリティカルになる可能性は低いと考えられる。

- ・ 満潮時に算定されたリーフ内波高のうち、短周期波高の再現性は、干潮時と同様に比較的良好であるが、観測波高よりも若干高めに算定する傾向にある。しかしながら、リーフ上護岸の越波量を推定する場合には、これは設計上、少なくとも安全側の数値を与えることになる。また、サーフビート波高について、観測結果では干潮時に得られたような大きな波高は観測されず、数値計算による再現性も比較的良好であった。なお、本編において算定したリーフ上護岸の設計諸元は、朔望平均満潮位に余裕高を加えた設計潮位 (D.L.+3.2m) に対して算定されており、大局的には、これらの傾向の延長上にある特性を有しているものと考えられる。
- ・ 平均潮位時に算定されたリーフ内波高の観測結果に対する再現性は、短周期波高、サーフビート波高とともに、比較的良好であった。しかしながら、満潮時や、満潮から干潮に移行する下げ潮時には、波による平均水位上昇や潮位差により、リーフ上に溜まった水塊が、速い流れを伴って局所的に沖へと流出するため、特に、リーフの切れ目周辺では、ブシネスクモデルの適用範囲を超えるような、波と流れの干渉による波高増大が生じることが推測される。したがって、このような海域に設置される構造物に対して、ブシネスクモデルによる波浪変形計算を行い、設計諸元を算定する場合などには、注意を要する。

CONTENTS

1. Influence on Wave Pressures of Wave-Dissipating Block state on Breakwater with Wave-Dissipating Block Layer
..... Katsumi SEKI, Taro ARIKAWA, Masahiro MIZUTANI 3
2. Evaluation of Design Wave Condition for Seawall on Coral Reef Calculated in Boussinesq-type Wave Transformation Model
..... Katsuya HIRAYAMA, Kazuto HARUO, Ichiro MIYAZATO 23